

Realizace torzního testu  
Torsion Test Realization

Vedoucí bakalářské práce:  
prof. Ing. Jan Fuxa, CSc.

Autor:  
Pavel Pavlíček

Ostrava, 2015

Jméno a příjmení autora: Pavel Pavlíček  
Název diplomové práce: Realizace torzního testu  
Název práce v angličtině: Torsion Test Realization  
Katedra: Aplikované mechaniky  
Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Jan Fuxa, CSc.  
Rok obhajoby: 2015

### **Anotace:**

Předmětem bakalářské práce „Realizace torzního testu“ je vývoj a výroba zkušební stolice pro torzní namáhání kruhových vzorků. Dále možnosti využití tenzometrie a optického měření pro vyhodnocování deformací a napětí u zkušebního vzorku. První část práce je zaměřena na popis vývoje zkušebního zařízení a jeho výroby a úskalí, s nímž se bylo nutno vypořádat. Druhá část práce popisuje teorii krutu a vyhodnocuje výsledky z tenzometrie, extenzometrie a optického měření.

### **Annotation**

The subject of this bachelor thesis is the development and manufacturing of a test bench for evaluating the torsion stress(nebo tension, jak chceš) of cylindrical samples. Furthermore it deals with the possibility of application of tensometrics and optical measuring for the evaluation of deformations and stress of a test sample. The first part of the thesis focuses on describing the development of the testing equipment and its manufacturing and issues that needed to be dealt with. The second part describes the torsion theory and evaluates the results of the tensometric, extenzometric and optical measurements.

### **Klíčová slova:**

Krutová zkouška, měřicí stolice, tenzometrie, optické měření

### **Keywords:**

Torsion test, measuring stool, tensometry, optical measurements

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠBTUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby. V

Ostravě: 25.07.2012

Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Pavel Pavlíček

Adresa trvalého pobytu autora práce: Komenského 274; 747 24 Chuchelná

### Poděkování:

Rád bych poděkoval panu profesorovi Janu Fuxovi za cenné rady a za to že my byl nápomocen při řešení bakalářské práce. Dále bych poděkoval firmě Skácel za poskytnutí obráběcích strojů při výrobě zařízení. Nakonec bych poděkoval svému otci Pavlu Pavlíčkovi za pomoc s výrobou a s vyhotovením zařízení.

Prohlašuji že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu a podklady jsem citoval.

V Ostravě 17.5 2015

Podpis studenta

<b>Obsah:</b>	<b>Strana</b>
1. Úvod	7
2.1 Popis zkušebního zařízení	8
2.2 Popis funkce stolice	9
2.2 Popis vzorku	9
2.3 Výpočet momentu k překroucení vzorku	8
3.0 Vývoj	12
3.1 Vývoj konstrukce a výpočty	12
3.2 Výpočet hřidelí	12
3.3 Výpočet spojky	13
3.4 Návrh unášeče	15
3.5 Návrh lepeného spoje	16
3.6 Návrh fixátoru momentu	17
3.7 Návrh základové desky	19
4.0 Montáž zařízení	20
4.1 Příprava před montáží	20
4.2 Montáž na základovou desku	21
5.0 Příprava měření	22
5.1 Příprava vzorku	22
5.2 Příprava fotoaparátu	23
5.3 Příprava stolice	23
5.4 Příprava tenzometru a extenzometru	23
6.0 Měření	24
7.0 Analýza výsledků	26
7.1 Analýza fotografií	26
7.2 Analytické řešení	29
7.3 Výpočet zkosu z tenzometrie	31
7.4 Srovnání výsledků tenzometrie a extenzometrie	33
7.5 Porovnání tenzometrie a analytického řešení	34
7.6 Srovnání tenzometrického a grafického řešení	35
7.7 Srovnání grafického a tenzometrického měření	37
7.8 Pokusná creepová zkouška	37

<b>8 Závěr</b>	39
<b>9 Použitá literatura</b>	40
<b>10 Seznam použitých značek</b>	41
<b>11 Seznam obrázků</b>	42
<b>12 Seznam tabulek</b>	43
<b>13 Seznam grafů</b>	43
<b>14 Přílohy</b>	43

## 1. Úvod

Tato práce se zabývá realizací torzního testu, vývojem a výrobou zkušebního zařízení, kterým lze provádět krutovou zkoušku dutého vzorku. Dle zadání bylo cílem vytvořit zařízení pro statickou zkoušku, které ob stojí v univerzálnosti a zároveň je snadné pro obsluhu. Univerzálnost zařízení spočívá v provádění těchto zkoušek: statická, nízko cyklová únava, případně také ke zkoušce tečení (creep). Dále je třeba vyvinout metodu optického odečítání deformací krutu pomocí počítačového softwaru. Je nutno přepočítat deformace na napětí a porovnat s tenzometrií pro kontrolu.

V další části je popsána teorie krutu a jsou odvozeny rovnice vyjadřující deformace, napětí a úhel zkrutu.

V konečné fázi této práce jsou analyzovány výsledky z tenzometrie a extenzometrie. Také zjištěny závislosti mezi analytickým výpočtem a experimentem. Tím se do budoucna získají podklady pro další zpřesňování metod vyhodnocování.

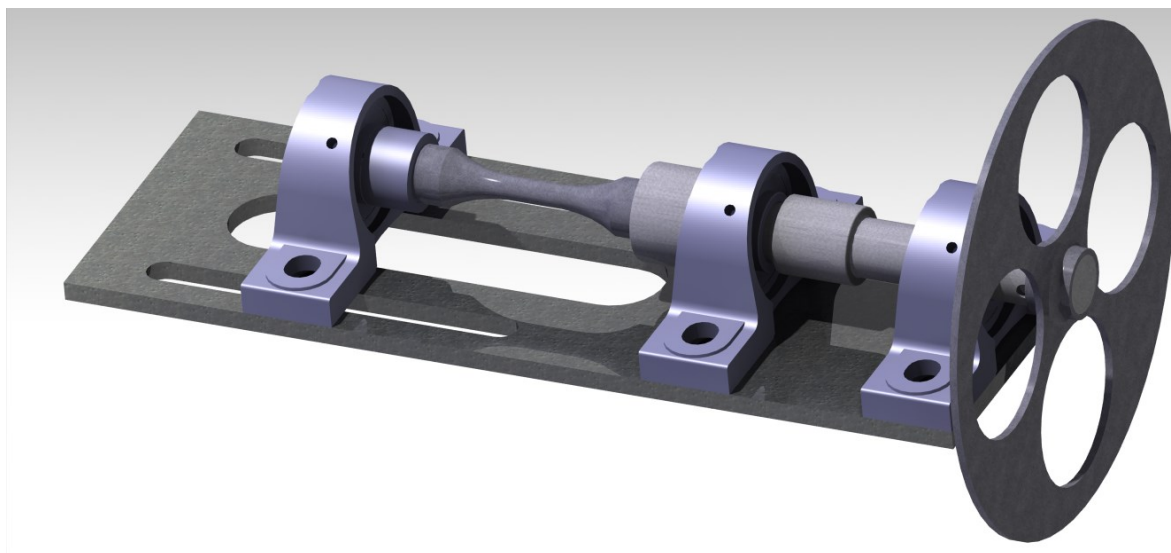
## 2.1 Návrh zkušebního zařízení:

Při návrhu zkušebního zařízení byly brány v úvahy tyto aspekty:

- jednoduchost obsluhy,
- univerzálnost stolice ,
- vysoká přesnost,
- precizní zpracování.

Cílem bylo vytvořit takové zařízení, které by bylo sestaveno z průmyslově vyráběných dílů a z normalizovaných součástí, čímž by byla zajištěna vysoká modulárnost a zároveň snížena výsledná cena zařízení.

Během vývoje byly navrženy dva typy možných zařízení, které vyházejí z podobných principů.

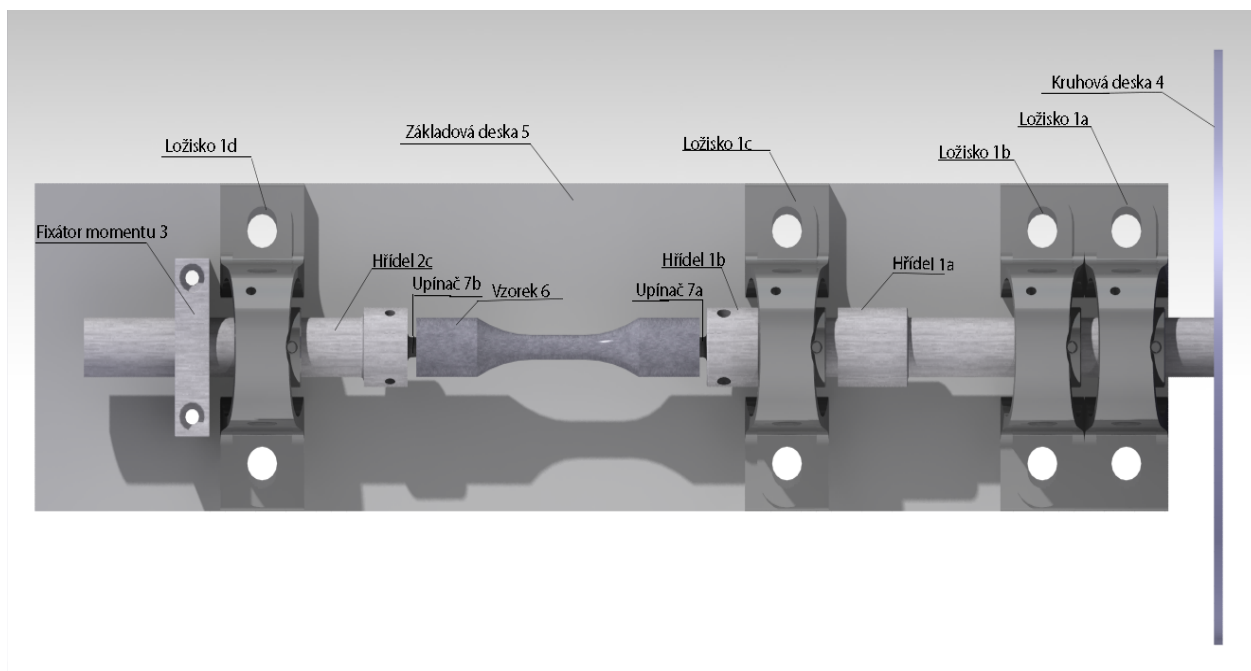


Obr. 1 Prvotní návrh

Vycházel jsem z toho, že zařízení by se mělo skládat z těchto součástí viz obr. 2:

- ložisek – 1a,1b,1c,1d
- hřídelí – 2a, 2b, 2c
- spojky – (2a-2b)
- fixátor momentu – 3
- Kruhová deska - 4
- základové desky - 5
- vzorku – 6
- upínač – 7a,7b





Obr. 2 Finální návrh

## 2.2 Popis funkce stolice:

Zkušební vzorek 6 je upnut do upínačů 7a, 7b pomocí lepidla. Upínač 8b spojen s hřídelí 2c, která je uložena v ložisku 1d a zároveň ve fixátoru 3. Upínač 8a je upnut v hřídeli 2b, která je uložena v ložisku 1c a je spojena pérem v otvoru hřídele 2a. Hřídel 2a je uložena v ložiskách 1b, 1a na hřídeli 2a je uložena kruhová deska 4, která je spojená s hřídelí pomocí pera. Na kruhovou desku 4 je zavěšeno po obvodě lankem závaží o hmotnosti  $m$ , které vyvozuje krouticí moment přenášený hřídelemi do zkušební vzorku 6.

### 2.3 Popis materiálu vzorku:

Vzorek je vyroben z materiálu Ansi 316L. Jedná se o austenitickou ocel s 2.5% přídavkem molybdenu, tato ocel poskytuje velmi dobrou ochranu vůči korozi.

Má vyšší odolnost vůči důlkové korozi a excelentní vlastnosti vůči:

- sulfátům,
- fosfátům,
- jiným solím.

Má rovněž lepší vlastnosti než klasické oceli pro styk s:

- mořskou vodou,
- redukujícími kyselinami,
- halogenidy.

Aplikace této oceli jsou následující:

- vodní pumpy,
- vačky,
- armatury,
- šrouby,
- díly pro petrochemický průmysl.

Chemické složení:

Jedná se o nízkouhlíkovou nemagnetickou nerezovou ocel s velkým obsahem chromu, niklu a molybdenu. Chemické složení viz. tabulka č.1.

Ansi 316L

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
Min	-	-	-	-	-	16.00	10.00	2.00	-
Max	0.03	1.00	2.00	0.045	0.03	18.00	14.00	3.00	0.1

Tabulka č. 1 Chemické složení

Mechanické vlastnosti:

Ocel má tyto mechanické vlastnosti viz tabulka č.2.

Ansi 316L

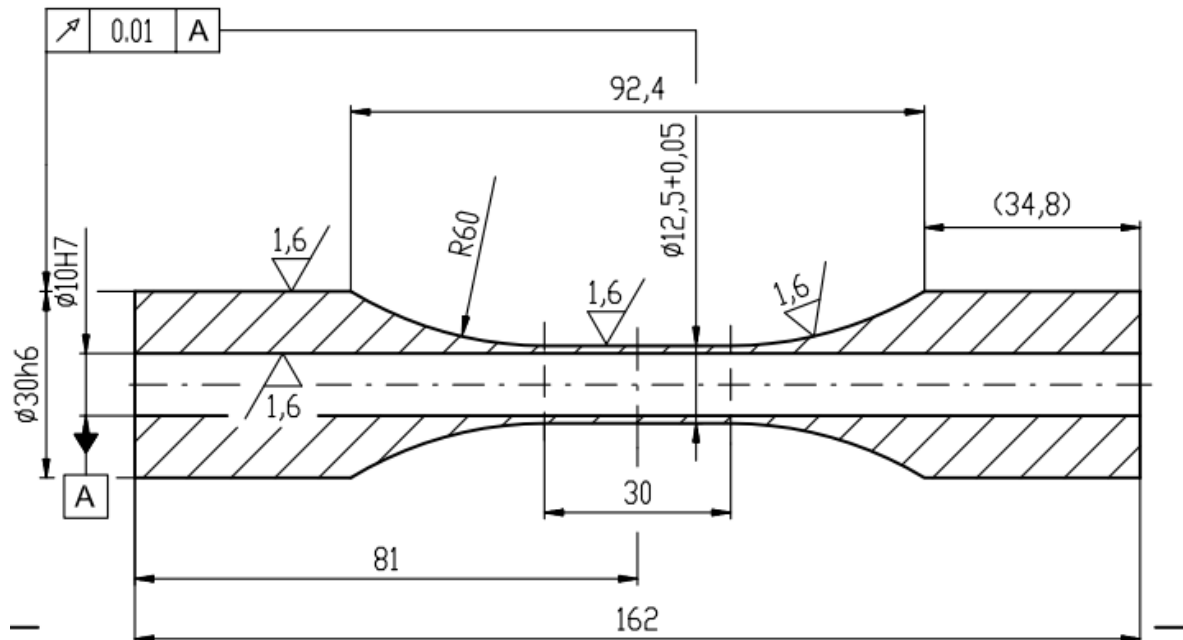
Mez pevnosti [MPa]	550
Mez pružnosti [MPa]	200
Youngův modul pružnosti [GPa]	193
Modul elasticity ve smyku [GPa]	70
Poissonovo číslo	0.25

Tabulka č.2 Mechanické vlastnosti

Další vlastnosti jsou obsaženy v materiálovém listu viz Příloha. A.

## 2.4 Popis vzorku:

Vzorek je vyroben z kruhové tyče o průměru  $D=30$  mm z materiálu Ansi 316L. Vzorek je dále opracován na CNC stroji dle výrobního výkresu viz. obr 3.



Obr. 3 Výkres vzorku.

## 2.5 Výpočet momentu nutného k ukroucení vzorku:

Výpočet vychází ze zjednodušené teorie plasticity.

Vstupující hodnoty:

D=12.5 mm

d=10 mm

$R_m = 550 \text{ MPa}$

### Výpočet poloměrů.

$$R_1 = \frac{d}{2} \quad R_2 = \frac{D}{2}$$

Výpočet meze pevnosti dle hypotézy H<sub>MH</sub>.

$$\tau_p = \frac{R_m}{\sqrt{3}}$$

Výpočet potřebného kroucího momentu k ukroucení vzorku.

$$M_{km} = \int_{R_1}^{R_2} \tau_p R dR 2\pi R = \tau_p 2\pi \int_{R_1}^{R_2} R^2 dR = \frac{\tau_p 2\pi}{3} [R_2^3 - R_1^3]$$

$$M_{km} = 79.2 \text{ Nm}$$

## 3.0 Vývoj

### 3.1 Vývoj konstrukce a pevnostní výpočty

Při vývoji zařízení bylo nutno vyřešit tyto problémy:

- zajištění souososti,
- upínání vzorků,
- fixace momentu,
- variabilita zařízení,
- zabránění přidavným silám na vzorek.

Prvním aspektem, se kterým se bylo nutno vypořádat, bylo určit maximální krouticí moment a z toho vypočít průměry hřídelí.

Krouticí moment byl zvolen s ohledem na výpočet ukroucení vzorku. Dle tohoto výsledku jsem volil s ohledem na užitečnou hodnotu stroje  $M_{kd} = 280 \text{ Nm}$ . Který je dostatečný pro přetržení vzorků a zároveň n dává dostatečnou rezervu pro přetrhnutí vysoko pevnostních materiálů a zároveň pro zkoušky větších průměrů vzorků. Dále jsou všechny součásti dimenzovány na toto zatížení.

### 3.2 Výpočet průměrů hřídelí:

Materiál zařízení jsem volil nerezovou tyč průměr 42 mm. Bezpečnost  $k$  jsem volil 1.5. Hřídele jsem navrhl z duté z důvodu ušetření hmotnosti a také k širšímu využití stroje viz Obr.4. Volil jsem vnější průměr  $D_h = 30 \text{ mm}$ , vnitřní  $d_h = 16 \text{ mm}$ . Mez pružnosti jsem volil s ohledem na materiál  $Re = 300 \text{ MPa}$ .

$$\tau_{kh} = \frac{M_{kd}}{\frac{\pi \cdot D_h^3}{16} - \frac{\pi \cdot d_h^3}{16}}$$

$$\tau_{kh} = 62.261 \text{ MPa}$$

Výpočet dovoleného smykového napětí:

Napětí budu počítat z hypotézy pevnosti HMM:

$$\tau_d = \frac{Re}{\sqrt{3}}$$

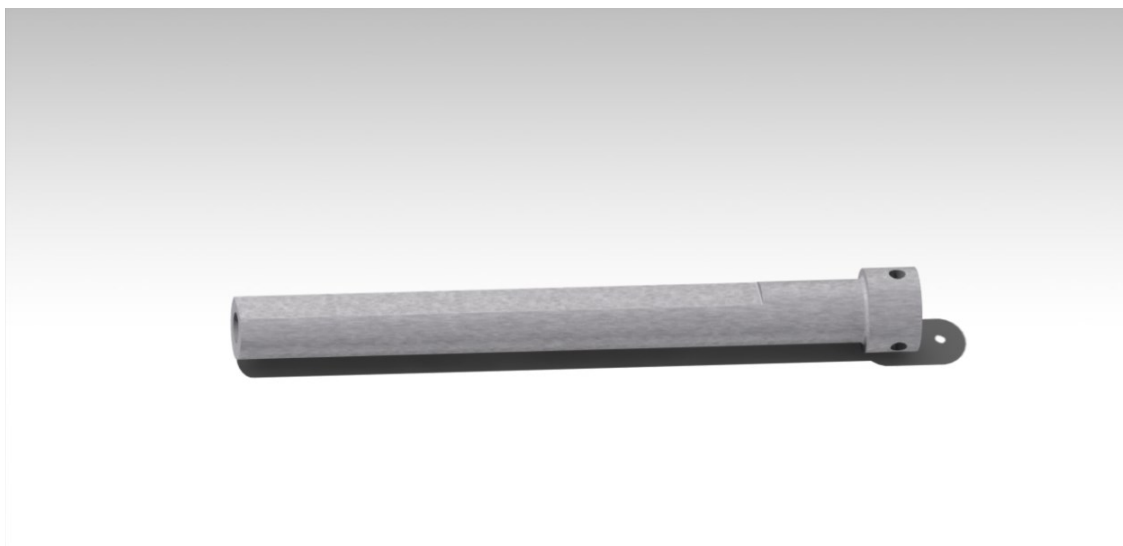
$$\tau_d = 162 \text{ MPa}$$

Bezpečnost hřídele:

$$k = \frac{\tau_d}{\tau_k}$$

$$k = 2.79$$

Bezpečnost hřídele odpovídá  $k = 2.79$ . Což je pro náš účel dobrý výsledek, který nám zajistí dobrou tuhost celého zařízení. A dobrou rezervu při maximálním zatížení.



Obr. 4 Hřídel 2c - viz obr.2

### 3.3 Výpočet spojky:

Spojka je řešena upraveným pérovým spojem, který slouží jako přenašeč momentu a v případě přetížení jako střížná pojistka. Spojka byla upravena zvýšením vůle mezi nábojem a hřídelí na hodnotu 0.3 mm, což umožňuje pracovat s výrobními nepřesnostmi, očekávám však, že bude docílena vysoká výrobní přesnost.

Bezpečnost s ohledem na dimenzování jsem volil  $k_p=1.3$

Výpočet délky pera:

$$l = \frac{2M_{kd}k_p}{D_h t_1 p_d}$$

$$l = 24 \text{ mm}$$

S ohledem na tuhost spojky volím délku pera 25 mm.

Kontrolní výpočet měrného tlaku na boky pera:

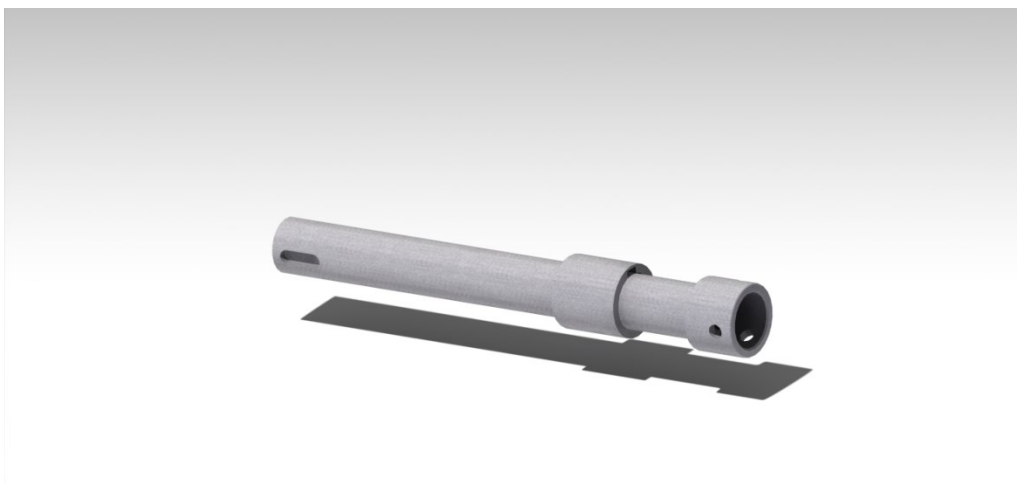
$$p_d = \frac{2M_k}{dt_1 l}$$

$$p_d = 240 \text{ MPa}$$

Kontrolní výpočet pevnosti ve stříhu:

$$\sigma = \frac{2M_k}{D_h b l}$$

$$\sigma = 93 \text{ MPa}$$



Obr.5 Spojka 2a, 2b - viz obr.2

Při kontrole v programu Ansys byla nalezena konstrukční chyba která by výrazně ovlivnila funkční hodnotu stroje. Z důvodu podcenění obecně zavedených zvyklostí  $D=(1.5-1.6)*d$  při navrhování průměru hřídele, jelikož nebyl materiál o daném průměru bylo rozhodnuto použít dostupný materiál  $d=40\text{mm}$ . Navrhnul řešení v podobě předepjatého lisovaného spoje, který vytvoří předpětí a tím sníží namáhání. A eliminuje poddimenzování spojky.

Lisovaný spoj je proveden za těchto podmínek:

- hřídel byl chlazen v mrazničce na teplotu cca  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  po dobu 10 hodin.
- Kroužek byl nahříván na elektrickém sporáku na teplotu cca  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  po dobu 20 min.
- Po vyjmutí z mrazničky byl hřídel potřen plastickým mazivem v místě spoje.
- Následně byl hřídel vsunut do kroužku.



Obr. 6 Lisování za tepla 2a – viz obr.2

### 3.4 Návrh upínače vzorku:

Při návrhu se brali v potaz různé typy upínání zkušebních vzorků. Zvážili jsme 3 typy upínání:

- pomocí kleštiny,
- pomocí šroubu,
- a pomocí lepidla.

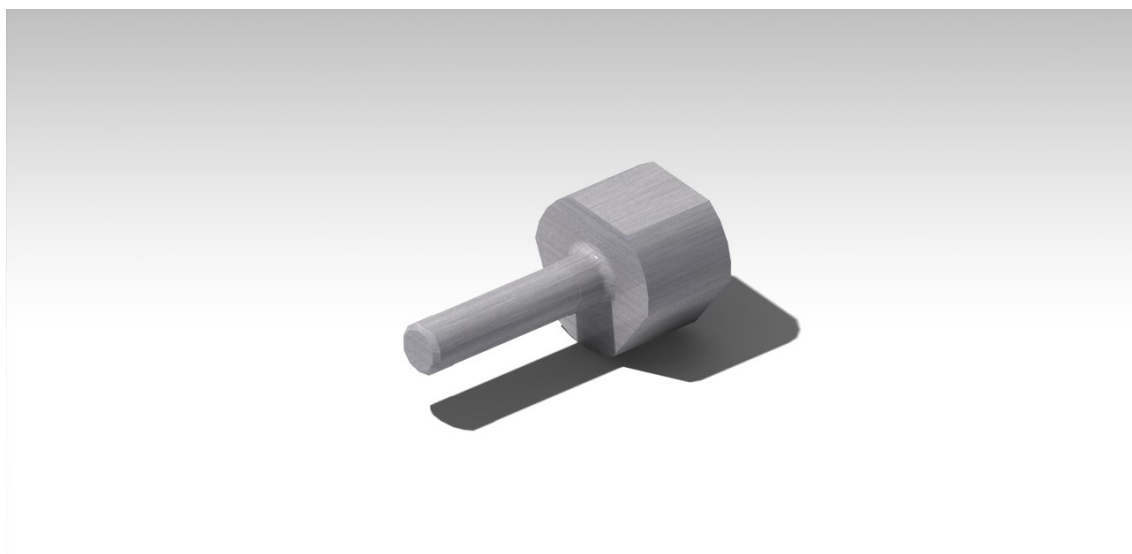
Lepidlo v tomto případě bylo vyhodnoceno jako nejlepší způsob upínání vzorků, jelikož poskytuje dobrou pevnost, snadnou montáž a v pozdějších fázích lepený spoj dokáže snížit výrobní náklady na vzorek a úsporu materiálů. Úspora spočívá v ušetření materiálu z důvodu upínání, je možnost zkoušet přímo polotovary o daném průřezu. Dalším aspektem je snížení výrobních nákladů, neboť nám odpadá obrábění vzorků a vytváření složitého profilu vzorku.

Jelikož zkušební vzorky mají předvrtaný otvor 10H7 bylo navrženo upínat vzorky za tuto díru pomocí lepeného spoje.

Vzorek byl lepen lepidlem Loctite 638, po celé válcové ploše a rovněž na čelní ploše. Čímž odpadlo dimenzování upínače, jelikož se krouticí moment přenesl do celého upínače čímž se snížil napětí a zabezpečil v případě porušení lepeného spoje mezi vzorkem a upínačem, tím se zabránila destrukci upínače.

Dalším požadavkem bylo vytvoření upínače, který je vložen do hřídel tak aby se zamezilo vyosením vzorků vlivem špatného upnutí a tím a přidavnému namáhání.

Toto kritérium je splněno lícovaným spojením hřídel upínače a zároveň tříbodovým upínáním pomocí šroubů do táhlých na stejný utahovací moment.



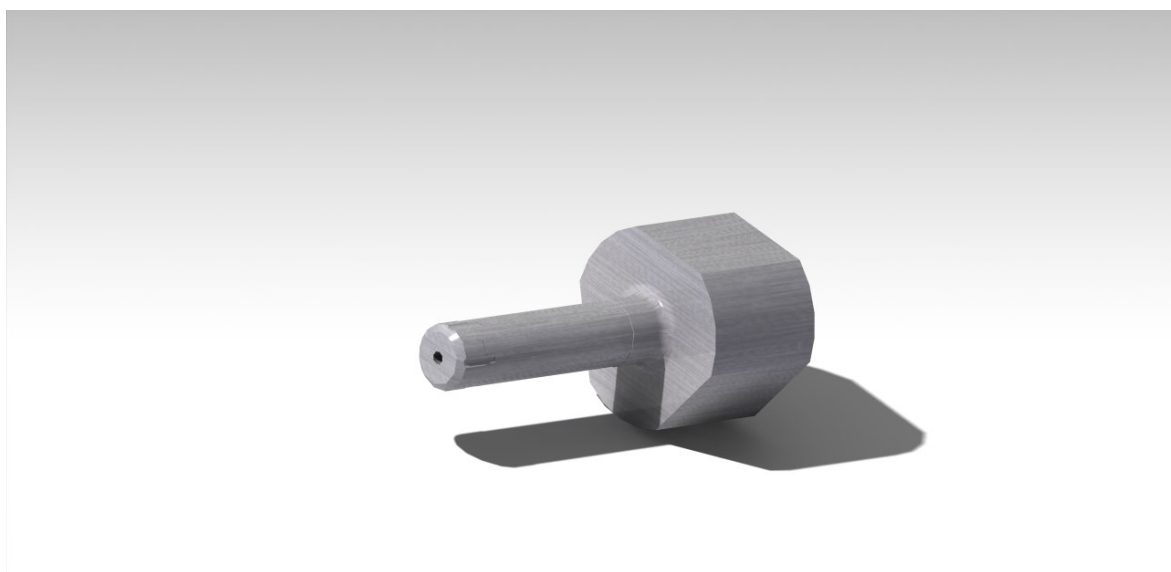
Obr. 7 Upínač 8a, 8b viz obr.2

U upínače se vyskytly konstrukční chyby, které negativně ovlivnily výslednou pevnost lepeného spoje a ztížily rozebíratelnost. Došlo ke dvěma jevům.

- Upínači chyběl od vzdušňovací otvor, čímž při nasazení druhého upínače došlo k přetlaku v otvoru a tím i vytlačení lepidla z lepené vrstvy. To se projevilo snížením únosnosti lepidla na hodnotu 45 Nm.

- Další konstrukční chyba byla ve ztížené rozebíratelnosti spoje z důvodu nemožnosti vydrolování lepidla z lepeného spoje tím, že se lepidlo natlačilo na stěny a zvýšilo tlak na stěnu vzorku.

- Z uvedených důvodů byl vzorek upraven vytvořením drážek, které zajistí vydrolování lepidla a tím i zamezit destrukci upínače.



Obr. 8 Modifikovaný upínač

### 3.5 Návrh lepeného spoje:

Lepené spoje v tomto případě jsou namáhány smykem. Což podle literatury [4] zabezpečuje kvalitní lepený spoj a vysokou pevnost. V našem případě bude použito lepidlo Loctite 638 které nám bylo doporučeno firmou Loctite v emailové korespondenci pro dané použití.

Jedná se o Akrylátové lepidlo na Urethan methakrylátové bázi, které slouží k upevňování lícovaných válcových součástí. Lepidlo vytvrzuje ve spáře bez přístupu vzduchu, přičemž plnohodnotná pevnost je zaručena po 24 h vytvrzování.

Lepený spoj lze rozebírat při teplotě 250 °C. Spára byla volena vzhledem k největší nosnosti lepidla na hodnotu 0.05 mm a drsnosti povrchu Ra 1.6 - vzhledem k dobré adhezi lepidla.



Výpočet maximálního krouticího momentu lepeného spoje:[4]

Statická smyková pevnost lepidla ISO 10123:  $\tau_{d2}=28 \text{ Nmm}^2$

Délka lepeného spoje:  $l=30 \text{ mm}$

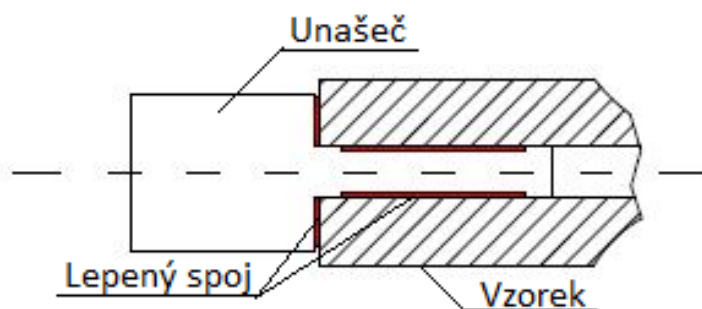
Střední průměr lepeného spoje  $d_l=5 \text{ mm}$

$$M_k = \frac{\tau_{d2} * \pi * d_l^2 * l}{2}$$

$M_k=65 \text{ N*m}$

Maximální krouticí moment do selhání lepeného spoje je roven  $M_k=65 \text{ N*m}$ .

Opravit vzorek srafy a přerušení.



Obr. 9 Lepený spoj

Tyto hodnoty my potvrdila firma Loctite kterou jsem požádal o provedení výpočtu pomocí jejich programu Retcalc. Dle jejich výpočtů má tento spoj pevnost limitní pevnost  $M_k=70 \text{ Nm}$ . Tato hodnota se však v praxi nepotvrdila, jelikož došlo k selhání spoje při  $M_k=62 \text{ Nm}$ . I tak je to dobrý výsledek a umožňuje použití u modifikovaného spoje.

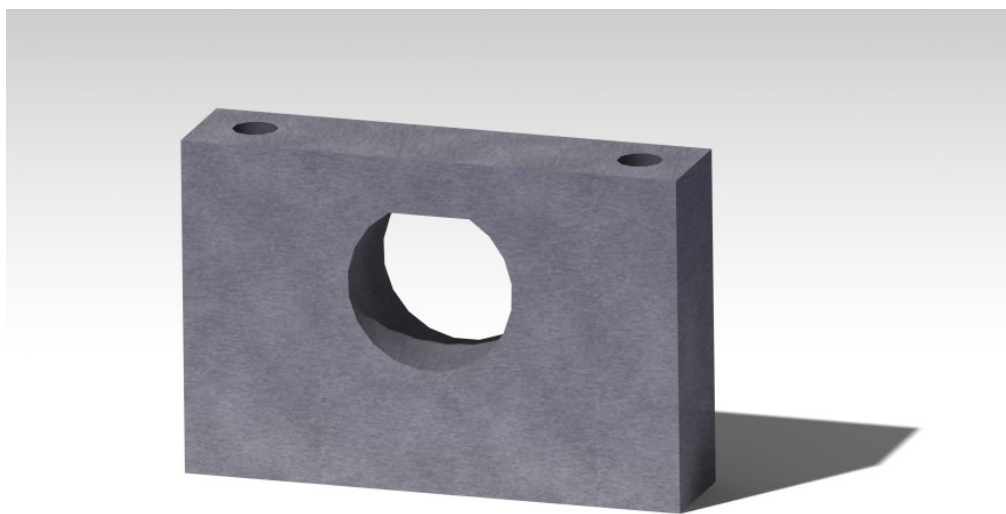
### 3.6 Návrh fixátoru krouticího momentu:

Fixátor krouticího momentu slouží k zachycení momentu na jedné straně zkušební vzorku. Při návrhu se počítalo s různými typy fixací pomocí kolíkového spoje nebo zavařením ložiska. Které se ovšem neshodovaly s celkovou koncepcí zařízení. Proto se vytvořilo jednoduché a precizní řešení daného fixátoru. Při návrhu fixátoru bylo nutno uvažovat :

- zajištění souososti,
- variabilita s ohledem na délku vzorku,
- jednoduchá obsluha,
- dostatečná tuhost.

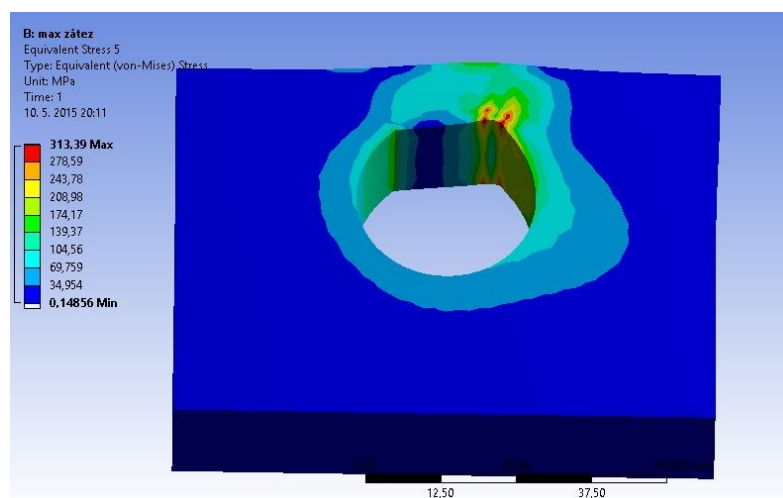
Při prvotním návrhu se počítalo s upínací ocelovou kostkou, ve které bude drátkem vytvořen přesný otvor (viz.obr.10), do kterého by se vkládala hřídel.

Toto řešení se ukázalo jako finančně nákladné proto byl vytvořen upravený návrh, ve kterém byly vyvrtány 3 otvory s dvěma otvory pro upínací šroub a jeden pro vedení hřídele. Otvor pro hřídel byl broušením slícován s hřídelí. Po té byla z kostky odřezána vrchní část zasahující 3 mm do díry, dále došlo k s frézování odřezané části do roviny. Dále pro návrh bylo nutné přesně výškově ustavit fixátor. To bylo provedeno přesným odměřením výšky ložiska a po té s broušením kostky na příslušný rozměr. (dopsat odkazy)



Obr. 10 Fixátor 3 viz obr. 2

Pro kontrolu upínacího zařízení byl vytvořen MKP model v programu Ansys, kterým byl překontrolován napěťový stav. Dle pevnostní analýzy nebyly pro maximální zatížení shledány žádné konstrukční chyby.



Obr. 11 Výsledky MKP

Dle výsledků MKP viz obr. 11 fixátor vyhovuje pevnostně pro maximální krouticí moment. Základní materiál má mez pružnosti  $\sigma_d=400\text{MPa}$ . Fixátor splňuje s bezpečností  $k=2$ , což nám pro daný účel vyhovuje s dostatečnou bezpečností. V maximech nám způsobí napětí lehké otlačení hřídelí a fixátoru. Jelikož stolice bude nejčastěji pracovat v režimu do 150 Nm tento výsledek lze považovat za vyhovující. Fixátor při testu nevyjevoval žádné chyby či nedostatky, při testu fungoval bez závad.

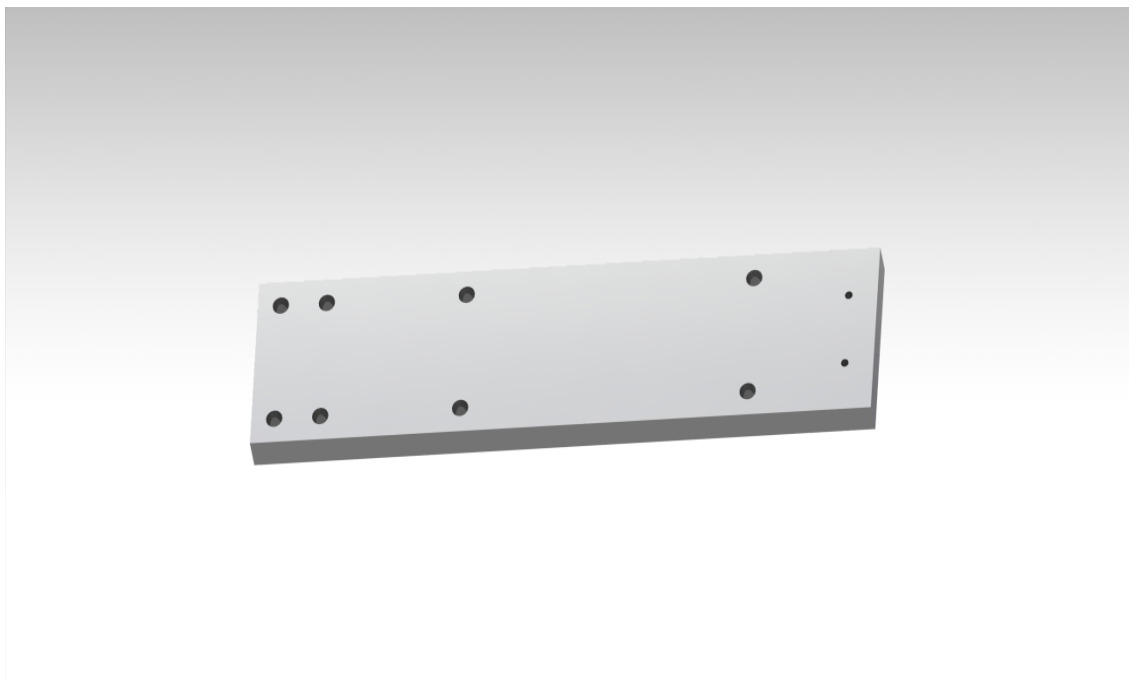
### 3.7 Návrh základní desky

Základní deska byla navrhnutá, aby splňovala tyto parametry:

- Rovinnost
- Tuhost
- Stabilitu

Základní deska je vyrobena z duralové slitiny o tloušťce 12 mm, která byla frézována do roviny na CNC stroji. Byly do ní vyvrtány díry a závity pro upevnění ložisek a fixátoru.

Při návrhu se počítalo s drážkami pro vedení ložisek a fixátoru. Od tohoto řešení se upustilo z důvodu složité výroby a větších výrobních nákladů při snížení tuhosti desky a z toho plynoucí snížení stability. Proto byl tento návrh zavrhnut ve prospěch účelnějšího řešení.



Obr. 12 Základová deska 5 viz. obr. 2

## 4 Montáž zařízení

### 4.1 Příprava před montáží

Při montáži zařízení bylo nutno dodržet přesné ustavení ložisek což je nejdůležitější a zároveň nejsložitější krok.

Na základní desku byly vyvrtány otvory se závity v dané rozteči, po té se do ložisek nasadil kalibrační trn o průměru 30mm na tento kalibrační trn byly nasezeny 4 ložiskové domečky, které byly rozestaveny v daných roztečích. Kalibrační trn zajistí souosost ve 2 osách a tím docílíme přesného ustavení.

Jelikož ložiska jsou výklopná, bylo nutné ustavit domečky tak aby byly rovnoběžné. To bylo řešeno lehkým přitažením šroubů, tím byla zajištěna kolmost k základní desce po té pomocí posuvného měřidla se kontrolovala rovnoběžnost. Pokud došlo k vychýlení domečku, pak se lehkým poklepem na domeček, srovnával, dokud nedošlo k požadované rovnoběžnosti. Po ustavení byly domečky dotáhnuty a provedla se kontrola rovnoběžnosti. Každý domeček byl fixem označen, aby se zabránilo promíchání domečků a tím i zmaření kalibrace.



Obr. 13 Ustavování souososti

Do domečků a základní desky, byly vyvrtány a vystruženy otvory o průměru 5 mm které složí pro dodatečné ustavení pomocí kolíků což nám zvýší tuhost celého zařízení a tím nám pomůže dodržet souosost v případě rázu.

#### **4.2 Montáž zařízení na základní desku:**

Před montáží bylo nutno provést tyto operace:

- očištění dosedacích a styčných ploch
- odmaštění závitů a děr
- nanesení lepidla Loctite 603
- utažení šroubů momentovým klíčem

První operací bylo očistit styčné plochy od vměstků a otřepů. V tomto kroku bylo nutné srazit hrany a lehce pilníkem vzít styčné plochy abychom měli jistotu že styčné plochy jsou rovné. Po té došlo omaštění všech závitů děr.

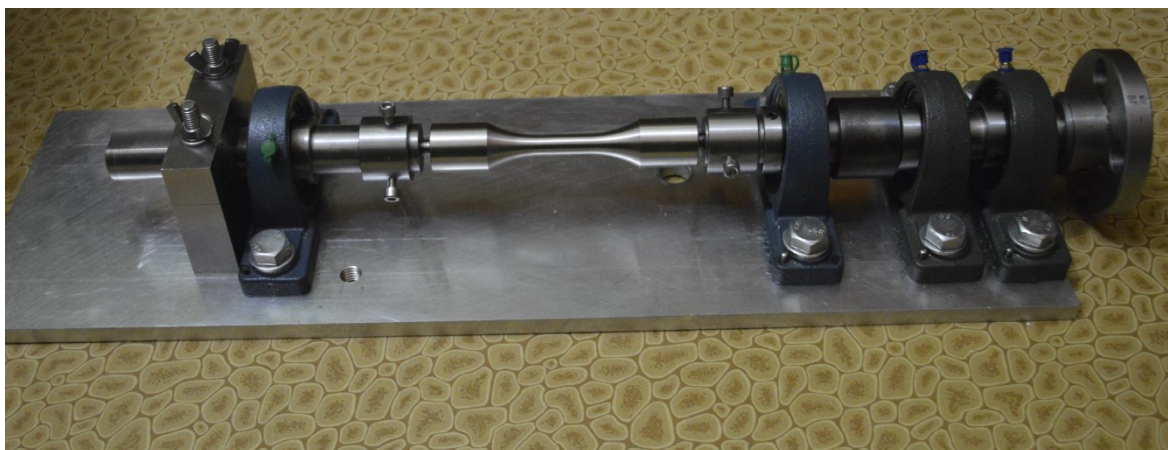
Dalším krokem bylo vložit do domečků hřídele. Hřídele byly lehce namazány motorovým olejem a po té byly vloženy do domečků. Do hřídelí jsou vložena těsná pera, která jsou zajištěna lepidlem Loctite 603.

Domečky byly po té vloženy na základovou desku a po té došlo ke spojení spojky. Do děr byly vloženy kolíky, na které bylo naneseno lepidlo Loctite 603 - kromě posledního ložiskového domečku, který je stavitelný. Po této operaci byly zašroubovány šrouby M14 a dotaženy momentovým klíčem na 40 Nm.

Fixátor byl nasezen na fixační hřídel a byl posunut na určenou pozici na základové desce. Do základové desky se zašroubovaly závrtné šrouby a vložil se horní kus fixátoru. Na závrtné šrouby se zašroubovaly křídlové matice.

Na náboj prvního hřídele je nasazena příruba, která byla zajištěna proti pootočení těsným perem. Na tuto přírubu byl nasazen kruhový disk, který byl přišroubován čtyřmi šrouby. Na tento disk se uchytilo ocelové lanko, na které se bude zavěšovat závaží, které vyvozuje zátěžný krouticí moment.

Poslední krokem bylo zašroubování upínacích šroubků do hřídelí. Tímto bylo zařízení provozu schopné.



Obr. 14 Sestavené zařízení

Při montáži bylo nutno pracovat obzvláště pečlivě z důvodů, aby se zabránilo chybám při montáži, které by nám mohli celkově ovlivnit měření a tím ho znehodnotit. Kontrolou správné montáže nám bylo vložení upínek a vzorku, který se dal upnout bez problémů.

## 5 Měření

### 5.1 Příprava vzorku:

Příprava vzorku je velice choulostivá z důvodu lepeného spoje u kterého musí být zajištěny tyto podmínky:

- čistota lepeného spoje
- odmaštění lepeného spoje
- doba vytvrzení
- přesná montáž.

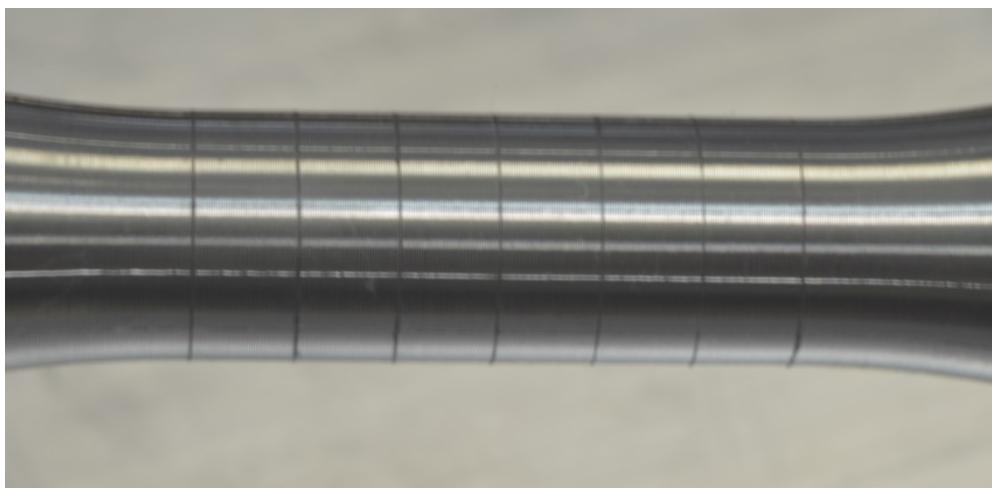
Před montáží se je nutné nejprve očistí vzorek a upínač od zbytků mastnot a olejů. Toto se uskutečnilo pomocí spreje Loctite 7063. Po vypřchání aerosolu se v rovnoměrné vrstvě nanese na upínač v tenké vrstvě lepidlo Loctite 638. Po té se vložil upínač do vzorku.

Po té se upínač přitisknul do vzorku, čímž lepidlo vyplnilo spáry na čele a zároveň se dosáhlo požadované spáry.

Po té se muselo počkat 5 minut na další manipulaci se vzorkem. Druhý upínač se upínal stejným způsobem. Po tom se vzorkem nemanipulovalo a zároveň se muselo, vyčkalo se dva dny na úplné vytvrzení lepidla- <dle grafu viz příloha lepidlo> . Dále bylo nutno na vzorek narýsovat rysky, ze kterých jsou vyhodnocovány uhlové natočení a deformace.

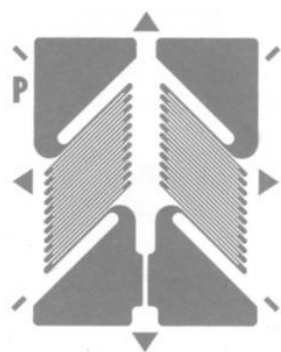
Rysky byly orýsované na dělicím přístroji. Vodorovné rysky jsou natočeny o 30°, svislé rysky jsou od sebe vzdáleny 5 mm. Tímto je vzorek připraven k použití viz obr. 15.





Obr. 15 Orýsovaný vzorek (doplnit do seznamu)

Druhý vzorek bude přichycen v hřídelích z důvodu destrukce upínače. Tím se vyzkouší upínání na hřídelích. Na tento vzorek je umístěn tenzometr, kterým se měří napětí na vzorku. Dále jsou na vzorku narýsovány 2 vodorovné rysky, které slouží k uchycení extenzometru. Tento vzorek slouží k ověření přesnosti tenzometru a extenzometru.



Obr. 16 Použitý tenzometr

## 5.2 Příprava fotoaparátu:

Vzorek byl focen ze 2 stran fotoaparátem Nikon D3200 a Sony. Fotografické zařízení bylo upevněno na stativěch a zároveň bylo použito dálkové spouští. Použití stativu bylo nutné z důvodu zabránění posunutí záběru a tím i znehodnocení měření. Z tohoto důvodu je užita i dálková spoušť. Při focení byl použit objektiv Zoom-Nikkor 35-70mm 1:3,3-4,5 s použitím makro předsádky Vivitar 2x Macro Focusing Teleconverter. Makro předsádka byla volena z důvodu většího zobrazení rysek a tím přesnějšího odečítání. Focení bylo provedeno s těmito parametry:

Clona f:22

Závěrka 2:1

Počet pixelů 22 Mpix

Vzdálenost od vzorku 30 cm

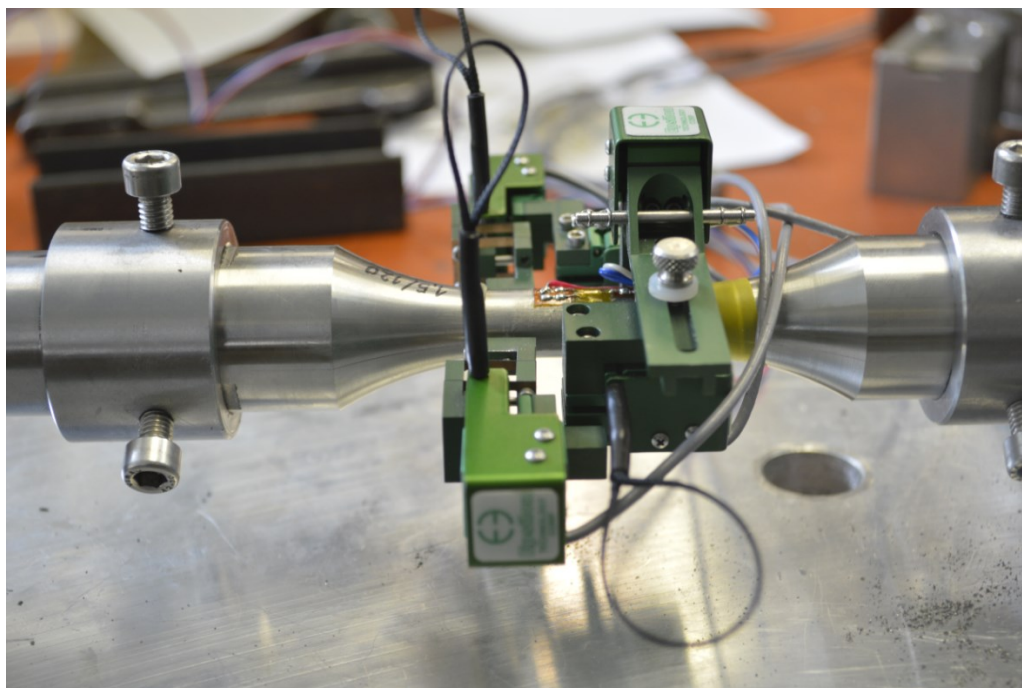
### 5.3 Příprava stolice:

Stolice byla přichycena pomocí truhlářských svěrek ke stolu. Po té byl vložen zkušební vzorek do stolice a pomocí šroubu byl přišroubován. Tím bylo zamezeno pohybu a zajištění vzorku. Na fixátoru se dotáhly šrouby, aby se zamezilo otáčení a na ocelové lanko byla přivázána konzole, na kterou se přikládalo závaží. Tímto byla stolice připravena k použití.

### 5.4 Příprava tenzometru a extenzometru

Extenzometr je nutno připojit k aparatuře. Po té je třeba nastavit K-factor, který dosahoval u námi použitého extenzometru hodnoty 1.97. Dále bylo třeba vynulovat aparaturu po upnutí vzorku. Extenzometr byl fixován na vzorek, tímto způsobem:

Hroty extenzometru se vložily do rysek, které sloužily jako referenční a zajistily správné ustavení. Po té se pomocí gumiček stáhly hroty extenzometru k sobě čímž, byly zajištěny posuvy viz obr. 17. Dalším krokem je vytáhnutí zajišťovacích kolíků. Nyní je nutno nastavit na počítači systém odečítání a parametry měření, vynulovat extenzometr. Tím je tenzometr a extenzometr připraven k použití.



Obr. 17 Ustavení extenzometru



## 6.0 Měření

Měření probíhalo následovně. Nejprve se ofotil vzorek v nezatíženém stavu, po té se na ocelové lanko připevnila konzola o hmotnosti 1 kg která vyvodila krouticí moment a zatížila vzorek, po té byl vzorek vyfotografován.

Závaží bylo přidáváno po 1 kg, přičemž byl vzorek průběžně fotografován. Během měření se vyskytl problém s dosednutím konzole na zem. Tento problém byl řešen převázáním lanka. Problém by se dal řešit zmenšením průměru kruhové desky, avšak by to negativně ovlivnilo zařízení, jelikož by bylo nutno větších zátěží pro vyvození shodného krouticího momentu. V pozdějších fázích měření byl zvednut stůl podložením „cihlami“, čímž byla zvýšena operativní funkce konzoly.

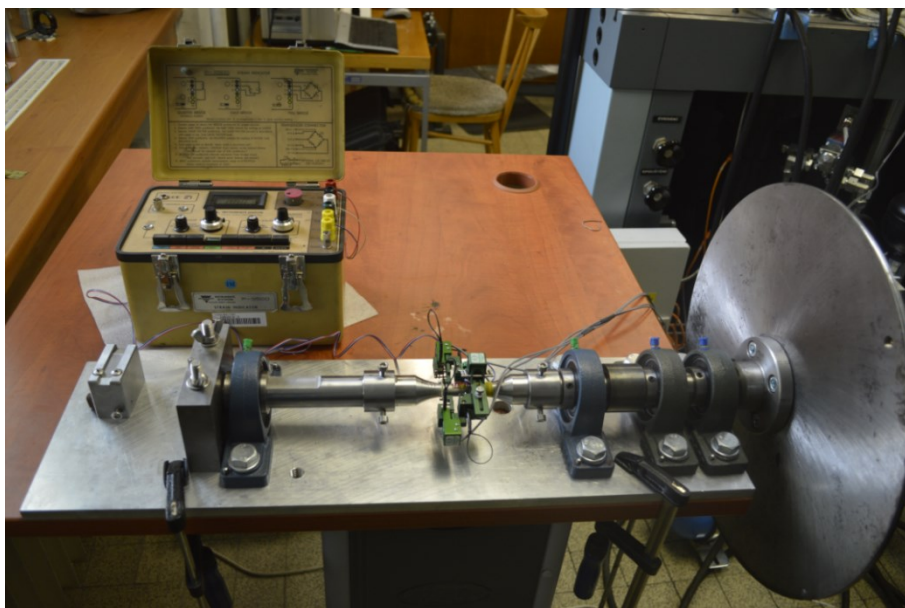
Při měření došlo k povolení lepené vrstvy při 23kg - z důvodů viz kap. 3.4 - Návrh upínače vzorku. Po té byl povolený upínač vytažen a upnut do hřídele. K druhému selhání lepeného spoje došlo při hmotnosti závaží 29 kg.

Měření pokračovalo, až do hmotnosti 36.72 kg, kdy došlo závaží. Po té byl přetržen vzorek vlastní silou, během kroucení byly vyfotografovány orientační výsledky - až do porušení vzorku. Vzorek byl ukroucen přesně v prostřední rysce a lom byl vyfotografován.



Obr. 18 Přetržený vzorek

Druhý vzorek se měřil obdobně, ale na tomto měření již nebylo třeba fotografického zařízení. Vzorek byl upnut do stolice, po té bylo nutno vynulovat extenzometr a tenzometr. A na kruhový disk se přidávalo závaží po 1kg. Po té se z tenzometrické aparatury odečetla hodnota. Z extenzometru byly hodnoty přímo zapisovány do počítače. Takto se měřilo do dosáhnutí hmotnosti 17 kg. Po té byl vzorek namáhán závažím o hmotnosti 27 kg a pokračovalo se v pokusné creepové zkoušce.

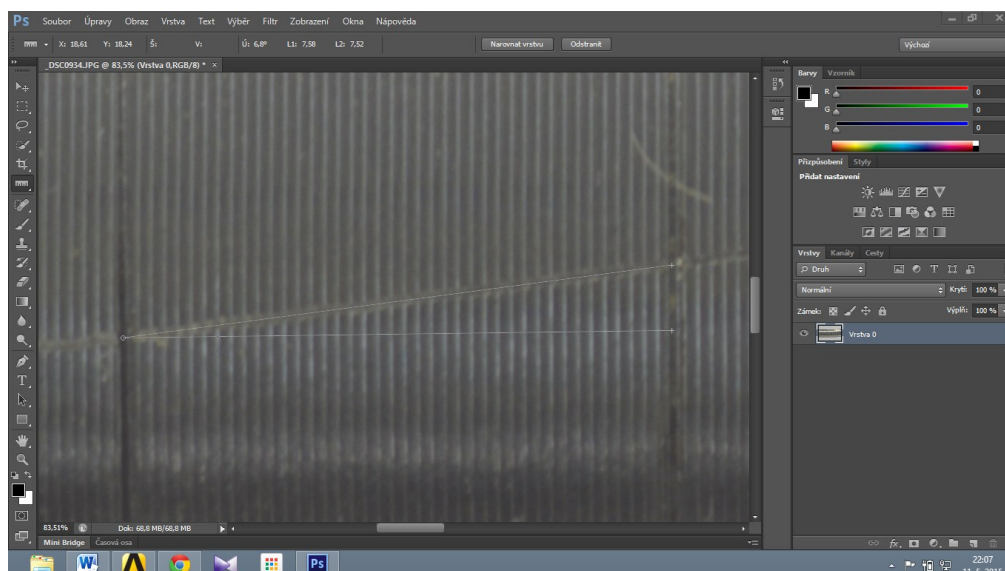


Obr. 19 Připravené zařízení pro tenzometrii a extenzometrii

## 7 Výsledky měření

### 7.1 Analýza fotografií:

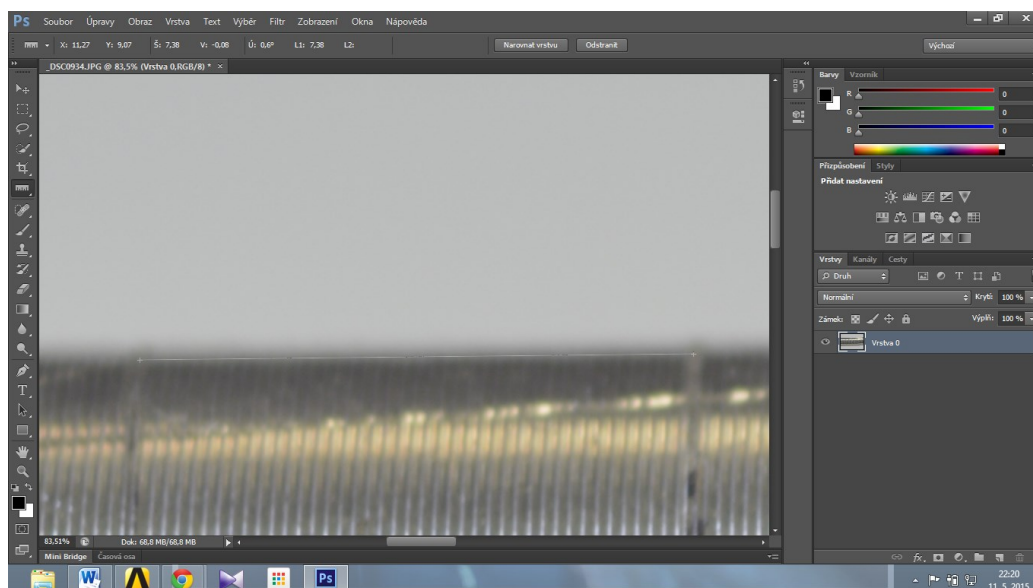
Výsledky měření byly porovnávány v programu Adobe Photoshop. Deformace byly odečítány pomocí funkce pravítka. Tímto způsobem dokážeme orientačně zjistit úhlovou deformaci vzorku viz. obr.20 .



Obr. 20 Odečítání deformací

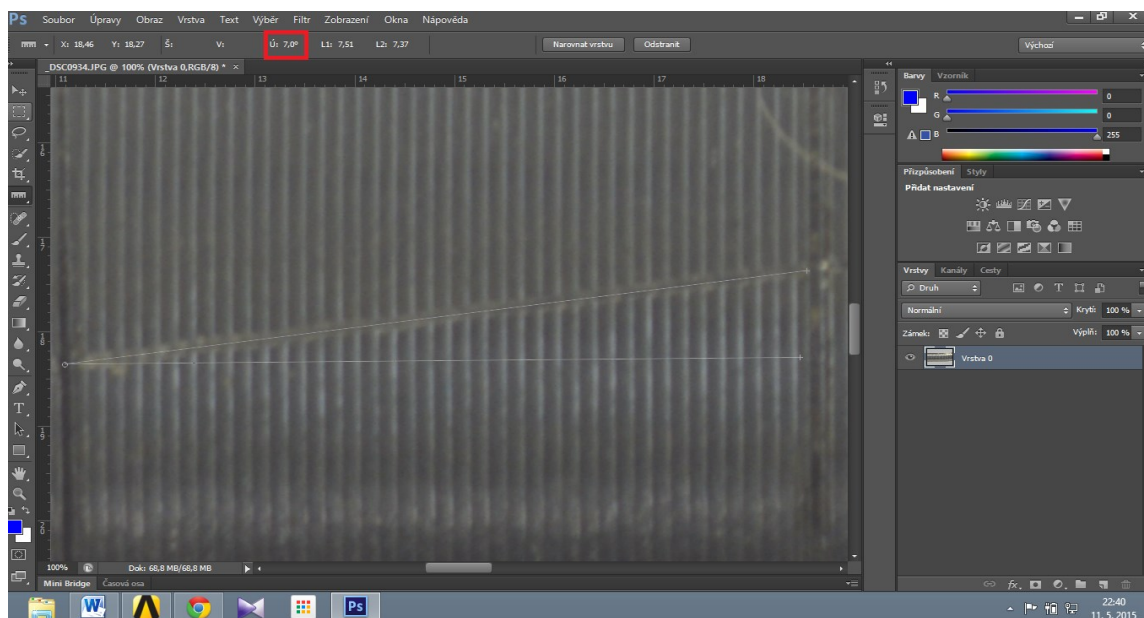
Před odečítáním bylo nutno nejprve srovnat vodorovnou osu s osou vzorku, čímž he zajištěna vodorovnost osy a zároveň tímto eliminujeme nepřesné snímání ze stativu.

Pravítko rovněž má v sobě funkci, která při přejetí do snímaného vzorku změní kontrast z šedé na bílou. Díky tomuto kontrastu přesněji nastavíme osu vzorku - viz obr. 21.



Obr.21 Nastavení osy

V dalším kroku je nutno posunout osu na referenční rysku a z koncového bodu vynést druhou úsečku, která je shodná s ryskou deformace, abychom mohli odečíst úhel zkosu. Tímto byla odměřena úhlová výchylka - viz obr. 22.



Obr.22 Odměrování

Toto odměřování bylo provedeno pro všechny snímky a hodnoty byly vloženy do tabulky - viz tabulka 3.

Naměřené hodnoty:

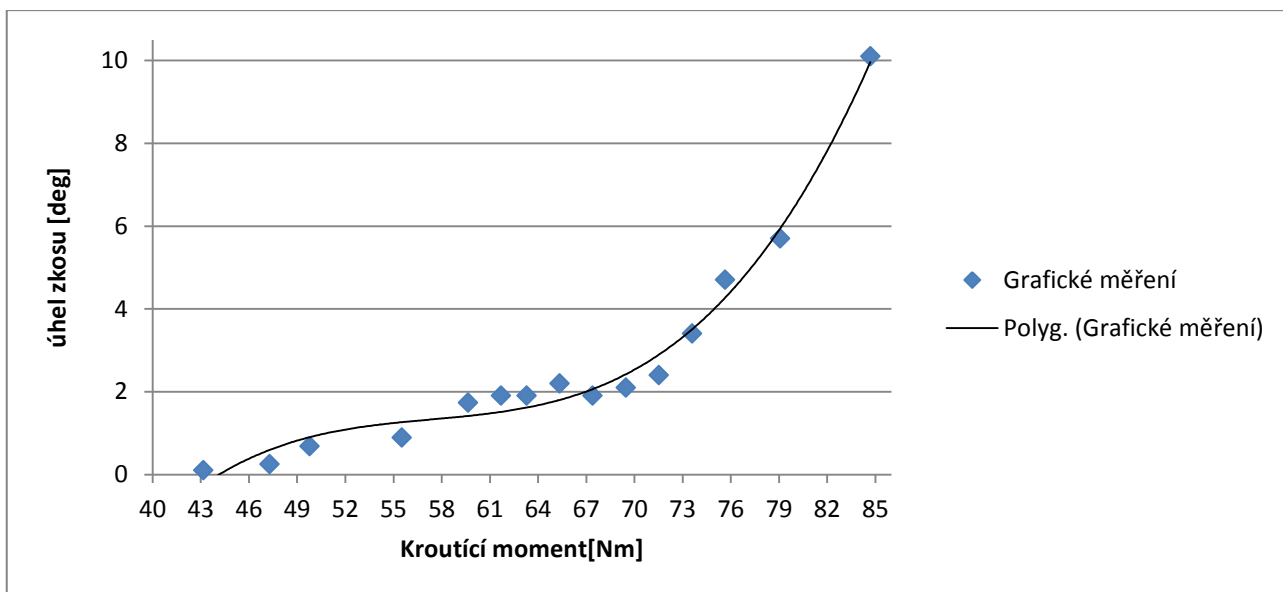
Číslo měření:	Hmotnost [kg]:	1. fotografie zkos [°]:	2. fotografie zkos [°]:	Extenzometrie zkos[°]:
11	20.95			0.106
12	22.95			0.25
13	24.16			0.68
14	26.95			0.89
15	28.95			1.73
16	29.95	1.9	1.9	
17	30.72	1.9	1.9	
18	31.72	2.2	2.2	
19	32.72	1.9	1.9	
20	33.72	2.1	2.1	
21	34.72	2.3	2.4	
22	35.72	3.0	3.4	
23	36.72	4.4	4.7	
24	38.39	5.3	5.7	
25	41.11	7.3	10.1	

Tabulka č. 3 Naměřené hodnoty

Od hmotnosti závaží od 20.95 do 28.95 byl použit extenzometr a nebylo prováděno ofocení rysek. Po této váze byl sejmут extenzometr a pokračovalo se ve fotografování.

Z fotografií do zátěže 29 kg nebylo možno rozeznat deformaci a určit zkos. Pro měření pro malé deformace je toto měření neuskutečnitelné z důvodu nepřesného odečítání díky malému projevu deformace. Toto by se dalo změnit zvětšením průměru vzorku a zvětšením sledované plochy čímž by se nám zvětšil prostor pro odečítání. Avšak tyto hodnoty by byly velmi orientační

Další zajímavou věcí, která se dala pozorovat bylo „lineární“ chování vzorku od hmotnosti 29.95kg do 32.72kg. Během této doby se vzorek téměř nedeformoval, ale po této hmotnosti začalo docházet ke ztrátě tvaru. Další zjištění je, že po odpojení extenzometru a vyfotografování nám hodnota zkosu „odpovídá“. Čímž máme potvrzeno, že pro plastickou oblast se tato metoda dá použít, jelikož vzorek dosahuje větších deformací, čímž nám je umožněno odečítat deformace ze vzorku pomocí fotografie. Ovšem tyto hodnoty jsou pouze orientační, ale můžou nám napovědět průběhy deformací na vzorku.



Graf č. 1 Závislost kroucího momentu na úhlu zkosu

Z grafu lze vypořorovat, že deformace při vyšších hodnotách kroucího momentu je již nelineární. Po dosáhnutí kroucího momentu cca 70Nm dochází k plastizování materiálu a k nárůstu deformací.

## 7.2 Analytické řešení:

Pro tento model do meze elasticity  $R_e$  jsem vypočetl analyticky deformace a porovnal jsem je s naměřenými hodnotami z tenzometrie a extenzometrie. Cílem bylo zjistit rozdíly mezi analytickým řešením a měřením.

Prvním krokem je nutno spočítat maximální kroucí moment do meze pružnosti, abychom zjistily limitní hodnotu, pro kterou platí vztahy z lineární pružnosti.

Dalším krokem je vypočítat uhel zkosu pro každý kroucí moment a po té porovnat s naměřenými hodnotami.

Výpočet limitního kroucího momentu:

Z materiálových vlastností víme, že mez pružnosti v tahu odpovídá hodnotě  $R_{ev}=200\text{MPa}$ , pro tuto hodnotu budeme počítat s použitím hypotézy pevnosti HMH mez elasticity v krutu  $\tau_{ke}$ .

$$\tau_{ke} = \frac{R_{ev}}{\sqrt{3}} \quad (1.1)$$

$$\tau_{ke} = 115 \text{ MPa}$$

Z této hodnoty je nutno vypočítat maximální krouticí moment pro mez elasticity. Tato hodnota nám složí pro to, abychom měli představu, pro jaký limitní krouticí moment budeme počítat.

Rovnice pro výpočet napětí:

$$\tau_{ke} \geq \frac{M_k}{W_k} \quad (1.2)$$

Rovnice pro výpočet průřezového modulu v krutu:

$$D=12.5 \text{ mm}$$

$$d=10 \text{ mm}$$

$$W_k = \frac{\pi D^3 \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right)}{16} \quad (1.3)$$

$$W_k = 226.416 \text{ mm}^3$$

Rovnice pro výpočet krouticího momentu pro mez elasticity.[č.3]

$$M_k \leq \tau_{ke} W_k \quad (1.4)$$

$$M_k \leq 26.028 \text{ Nm}$$

Maximální krouticí moment, pro který se chová vzorek jako elastický, nesmí překročit hodnotu 26 Nm.

Rovnice pro výpočet maximální hmotnosti závaží:

$$g = 9.81 \text{ ms}^{-2} - \text{tíhové zrychlení zemské,}$$

$$l_p = 0.21 \text{ m} - \text{poloměr kruhové desky viz.obr.2.}$$

$$m = \frac{M_k}{g \cdot l_p} \quad (1.5)$$

$$m = 12.63 \text{ kg}$$

Do hodnoty 12.63 kg můžeme počítat, že se vzorek chová podle lineární pružnosti. Do této hodnoty budeme porovnávat analytické řešení s naměřenými hodnotami.

Výpočet polárního kvadratického momentu průřezu:

$$J_p = \frac{\pi D^4 \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right)}{32} \quad (1.6)$$

$$J_p = 1415 \text{ mm}^4$$

Výpočet krouticího momentu:

$$M_k = gml_p \quad (1.7)$$

Výpočet úhlu zkosu: [č.3]

$$\gamma = \frac{M_k R}{GJ_p} \text{ [rad]} \quad (1.8)$$

Jelikož je výsledek v radiánech je nutno přepočítat na výsledek na stupně:

Přepočet [rad] na [°]:

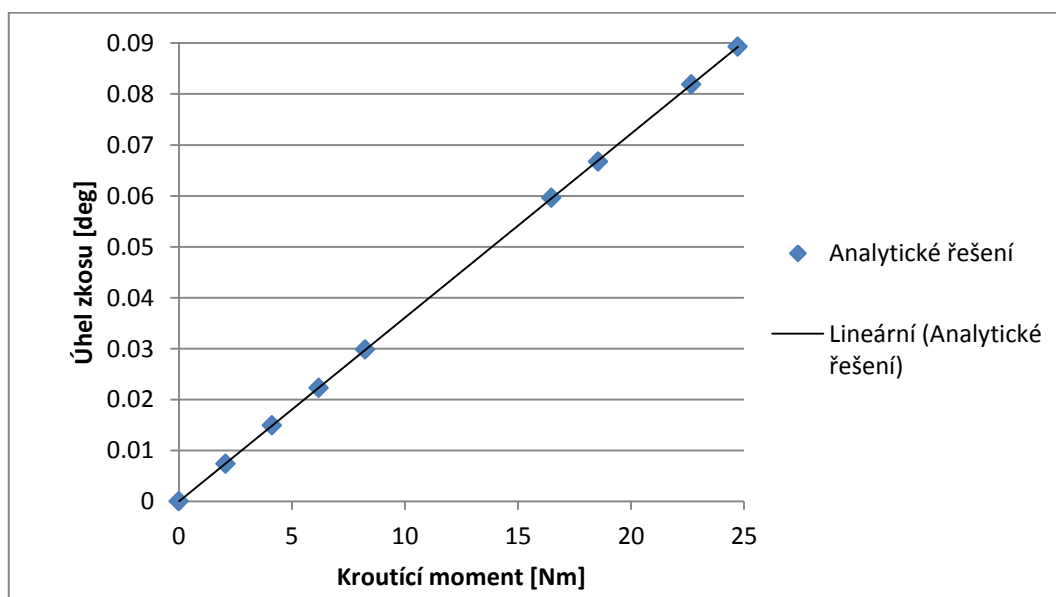
$$\gamma_{deg} = \frac{\gamma\pi}{180} \quad (1.9)$$

Tabulka vypočtených hodnot:

Krouticí moment [Nm]	Úhel zkosu [deg]
0	0
1	0.0074
2	0.0149
3	0.0223
4	0.0298
8	0.0596
9	0.0667
11	0.0819
12	0.0893

Tabulka č.4 Analytické řešení

Výsledky z analytického řešení byly zaznamenány graficky viz graf č.2.



Graf č.2 Závislost krouticího momentu na úhlu zkosu

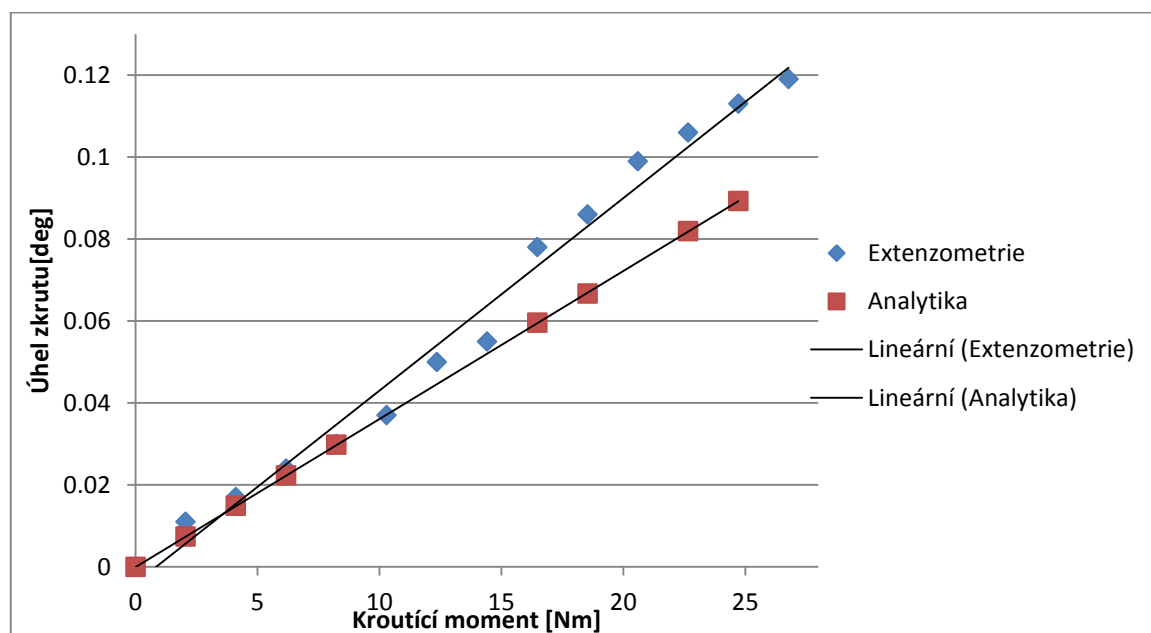
### 7.3 Analýza výsledků z tenzometrie a extenzometrie:

Výsledky z tenzometrického měření a extenzometrie.

Hmotnost [Kg]	Extenzometrie [°]	Tenzometrie [ε]
1	0.011	0.1
2	0.017	0.157
3	0.024	0.210
4	0.03	0.267
5	0.037	0.325
6	0.05	0.444
7	0.055	0.5
8	0.078	0.693
9	0.086	0.751
10	0.099	0.866
11	0.106	0.925
12	0.113	0.983
13	0.119	1.040
14	0.127	1.100
15	0.133	1.161
16	0.140	1.222
17	0.147	1.285

Tabulka č. 5 výsledky Tenzometrie a extenzometrie

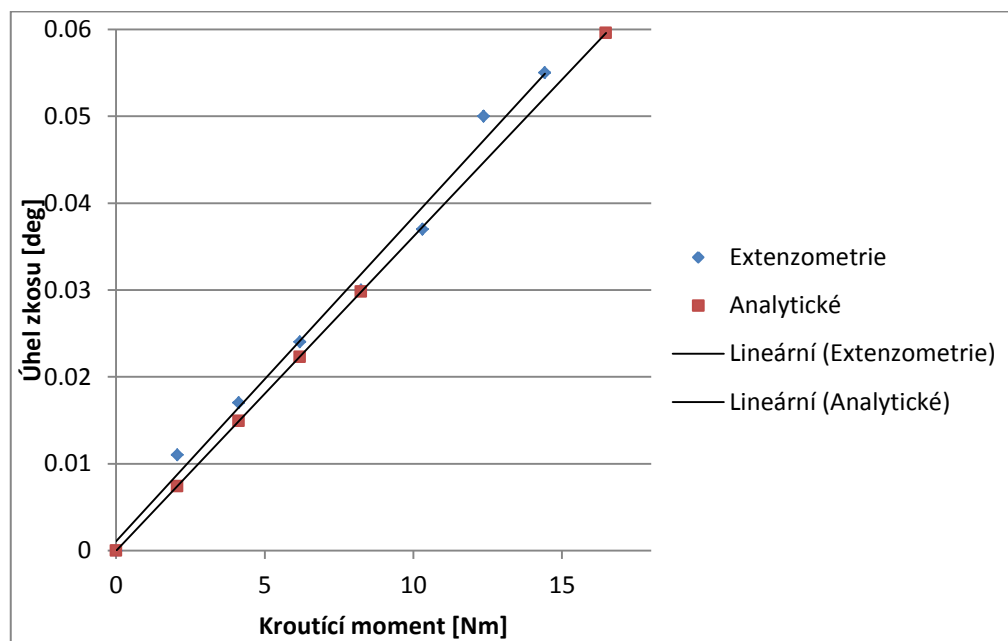
Nejprve bude provedeno srovnání mezi extenzometry a analytickým řešením. viz graf č.3



Graf. č.3 Srovnání analytického řešení a extenzometrie



Z grafu lze vidět zajímavou závislost do cca 16 Nm se měření shoduje s analytickým řešením, po této hodnotě dochází k nárůstu deformace, avšak dále se model chová lineárně. Další zajímavým faktem je že extenzometrie se po momentu 16 Nm, což odpovídá 58% mezního momentu, se značně rozchází s analytickým řešením. Do této hodnoty celkem odpovídá analytickému řešení. Pro kontrolu je vytvořen graf s hodnotami do 16 Nm. Pro ověření tohoto tvrzení viz graf č.4 .

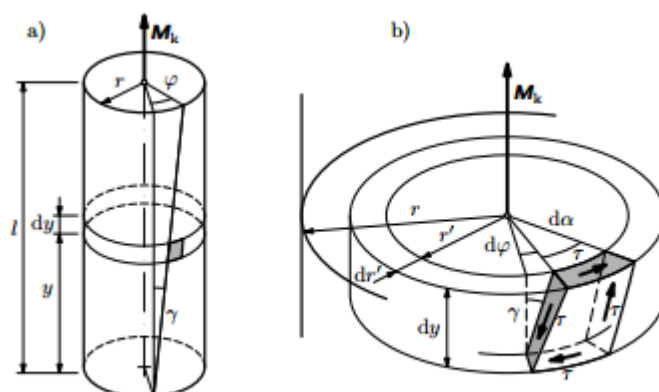


Graf č.4 Porovnání výsledků do 16 Nm

Z grafu vyplývá že, výše přiložený předpoklad platí do 58% zátěže lze vyvodit, že extenzometr měří dostatečně přesně a shoduje se analytickým modelem. S největší pravděpodobností se stala chyba měření z důvodu ukotvení extenzometru. Doporučuji proto pro kontrolu provést měření s přilepenými hroty.

#### 7.4 Výpočet zkosu z tenzometrie:

Při krutu (torzi) válce s kruhovým průřezem na jednom konci vetknutém a na druhém konci namáhaném vnější silovou dvojicí dochází ke vzájemnému natáčení průřezů kolmých k podélné ose válce. Experimentálně lze ověřit, že u rotačního válce zůstávají kruhové průřezy i po deformaci úsečky přímé. Průřezy se tedy otáčejí kolem osy válce, aniž se deformují. Celkové otočení horního kruhového průřezu válce oproti spodnímu vetknutému průřezu označíme  $\phi$ . [3]



Obr. 23 K popisu deformace při torzi [3]

Pro výpočet napětí vytkneme z válce o délce  $l$  elementární trubici o výšce  $dy$ , poloměru  $r'$  a tloušťce  $dr$  podle obr. 23. Z této trubice vyjmemme hranolek, který se při deformaci zkosí. Pro jeho zkos platí: [3]

$$\gamma = \frac{r' d\varphi}{dy} = r' \vartheta.$$

Nejprve je nutno určit smykové napětí, které je definováno takto:[2]

$$\tau = G2\varepsilon, \quad (2.1)$$

$G$  – Modul pružnosti ve smyku

$\varepsilon$  – Poměrné prodloužení

Pro krouticí moment platí:[2]

$$M_k = \tau W_k \quad (2.2)$$

Pro zkos platí tato rovnice:[3]

$$\gamma = \frac{r' d\varphi}{dy} = r' \vartheta \quad (2.3)$$

Poměrný úhel zkrutu rovnice:[3]

$$\vartheta = \frac{\varphi}{l} = \frac{M_k}{GJ_p} \quad (2.4)$$

Z rovnice (2.4) se dosadí do (2.3) a vyjádří se  $M_k$  po té se vyjádřená rovnice s rovnicí (2.2) dosadí do rovnice (2.5) a z této rovnice se vyjádří rovnice pro úhel zkosu:

$$M_k = M_k \quad (2.5)$$

$$\frac{\gamma GJ_p}{r'} = G2\varepsilon W_k \quad (2.6)$$

$$\gamma = \frac{G2\varepsilon W_k}{GJ_p} = \frac{2\varepsilon W_k}{J_p} r' \quad (2.7)$$

Jelikož maximální deformace a tečné napětí se vyskytují na povrchu součásti, proto bude:

$$r' = \frac{D}{2}$$

$$\gamma = \frac{2\varepsilon W_k}{J_p} r' = \frac{2\varepsilon \pi (D^3 - d^3) 32}{16\pi (D^4 - d^4)} \cdot \frac{D}{2} = \frac{2\varepsilon D (D^3 - d^3)}{(D^4 - d^4)} \quad (2.8)$$

$$\gamma = \frac{2\varepsilon D (D^3 - d^3)}{(D^4 - d^4)}$$

Pomocí tohoto vztahu přepočteme hodnotu z tenzometru na úhel zkosu hřídele.

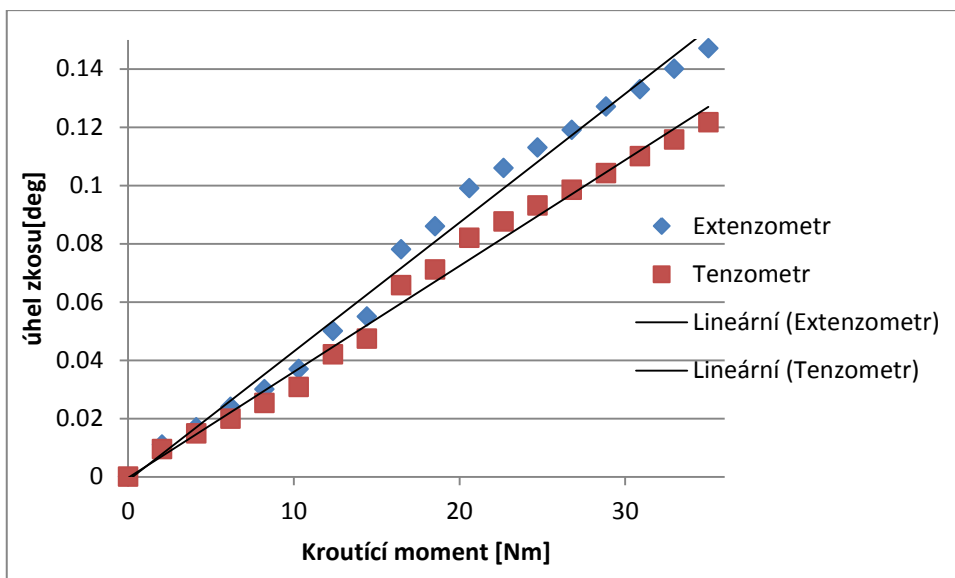
## 7.5 Srovnání výsledků tenzometrie a extenzometrie:

Tabulka vypočtených hodnot zkrutu tenzometrie:

Č. měření	Poměrná deformace $\varepsilon$ [m*mm <sup>-1</sup> ] (tenzometr):	Vypočtený úhel zkosu [°]:	Rozdíl mezi extenzometrem a tenzometrem [°]:
1	0.1	0.00947	0.00153
2	0.157	0.01487	0.00213
3	0.210	0.01989	0.00411
4	0.267	0.02529	0.00471
5	0.325	0.03078	0.00622
6	0.444	0.04205	0.00795
7	0.5	0.04736	0.00764
8	0.693	0.06569	0.01231
9	0.751	0.07113	0.01487
10	0.866	0.08202	0.01698
11	0.925	0.08761	0.01839
12	0.983	0.09311	0.01989
13	1.040	0.09851	0.02049
14	1.100	0.10419	0.02281
15	1.161	0.10997	0.02303
16	1.222	0.11574	0.02426
17	1.285	0.12171	0.02529

Tabulka č.6 Tabulka vypočtených hodnot zkosů

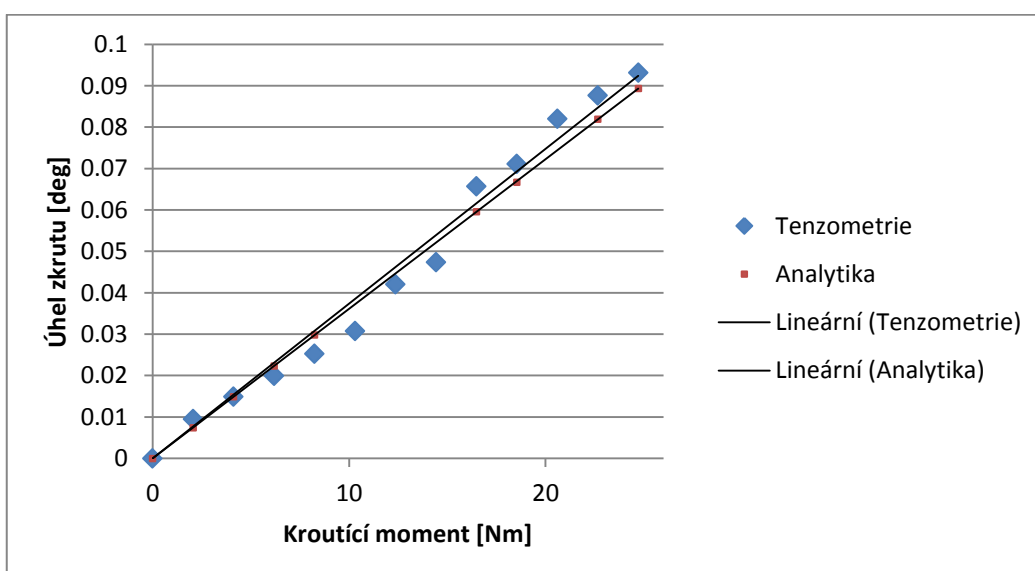
Jak lze vidět tak z tabulky, není rozdíl mezi extenzometrií a tenzometrií zásadní. Lze pozorovat, že se zvětšující deformací roste chyba. Chyba u maximální deformace se pohybuje v řádu 18%. Pro lepší představu je vypracován Graf č.5.



Graf č.5 Porovnání extenzometrie a tenzometrie

V tabulce můžeme vidět, že rozdíly mezi extenzometry a tenzometry roste se zvětšující se deformací. Tato chyba může být způsobena nepřesným nalepením tenzometru nebo špatným upnutím extenzometru. Z grafu vyplývá, že obě metody poskytují dobrý výsledek a jsou slučitelné. Další zajímavou věcí, která je popsána výše, je skokový nárůst deformací po zatížení 16 Nm.

## 7.6 Porovnání tenzometrie a analytického řešení:

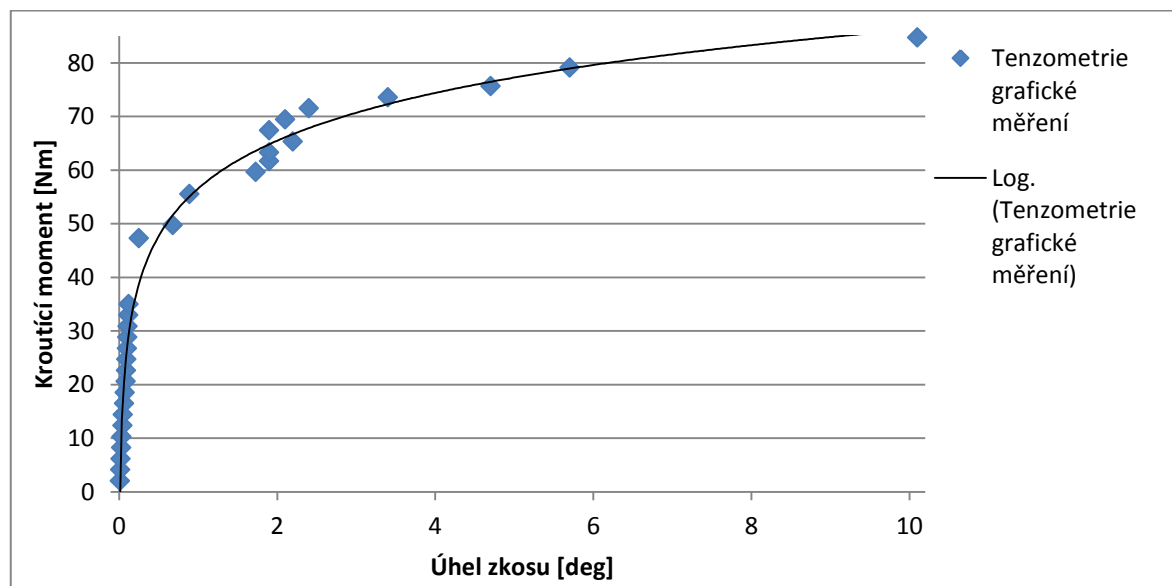


Graf č. 6 Porovnání tenzometrie a analytického řešení

Jak lze dle grafu č. 6 vypořádat mezi tenzometrií a analytickým řešením dostáváme velmi malé rozdíly, co se týče úhlu zkosu z tohoto důvodu zamítám předpoklad špatně ustaveného tenzometru. Rovněž lze podle dat vyvodit, že rozdíl mezi analytickým řešením a tenzometrií roste se zvětšující deformací. Pro toto by bylo vhodné provést více kontrolních měření.

### 7.7 Srovnání grafického a tenzometrického měření:

Pro představu jak probíhá deformace, byl vytvořen orientační graf pro srovnání výsledků tenzometrie a grafického řešení. Tím získáme závislost deformací na krouticím momentu. Tento graf by se měl shodovat s grafem krutové zkoušky. Je nutno říci že graf je pouze orientační:



Graf č. 7 Spojení výsledků tenzometrie a optického měření

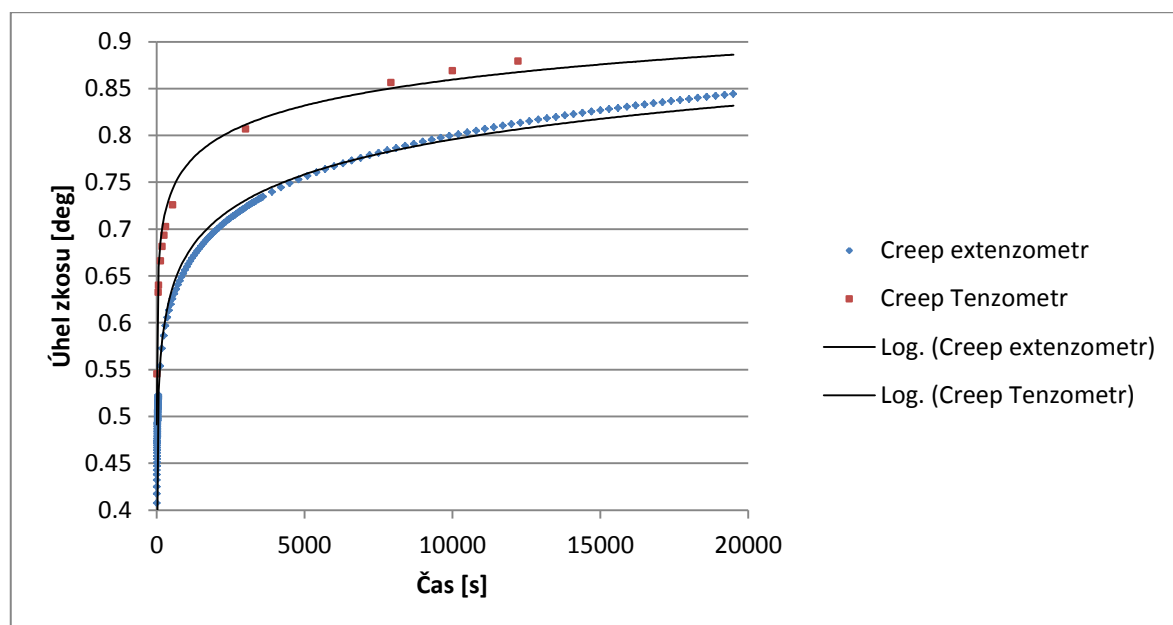
Graf svým tvarem odpovídá grafům zkoušek nerezových materiálů. Jedná se pouze o orientační graf, bylo by vhodné provést zkoušku materiálu na certifikované stolici a porovnat výsledky měření, abychom zjistili použitelnost metody.

### 7.8 Creepová zkouška:

Po ukončení měření tenzometrie a extenzometrie bylo dalším cílem provést pokusně creepovou zkoušku. Během měření bylo použito extenzometrie i tenzometrie. Toto měření je jenom doplňkové a tato práce se nebude tímto problémem zabývat z důvodu neznalosti tohoto tématu a není to cílem této práce.

Průběh zkoušky:

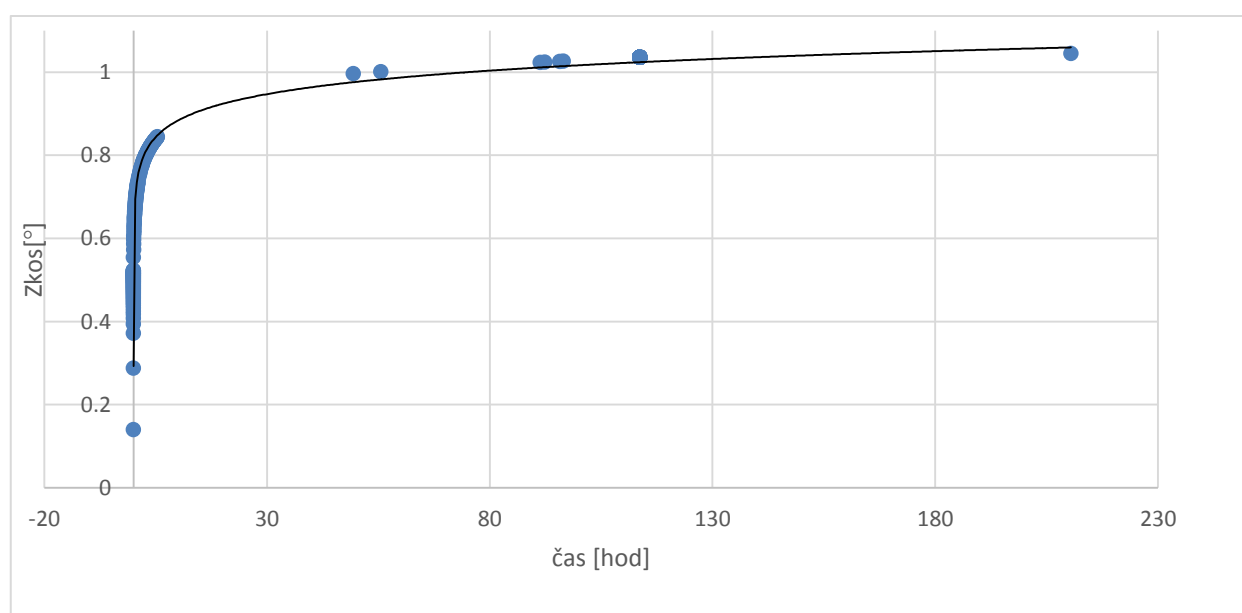
Creepová zkouška trvala zhruba 11dní, po tuto dobu byl vzorek zatěžován závažím o hmotnosti 26.795 kg. Během této doby byla neustále snímána deformace extenzometrem. Během prvního dne byl vzorek snímán i tenzometrem, po té bylo měření ukončeno. viz. graf č.8.



Graf č.8 Creepová zkouška s použitím tenzometrie

Jak lze vidět dle creepové zkoušky, zatížený vzorek stále „teče“. Tenzometr ukazuje vyšší hodnoty než extenzometr.

Pro kompletní creepovou zkoušku je vytvořen graf č. 9, který nám popisuje tečení materiálu snímaného po delší časový úsek.



Graf č.9 Creepová zkouška

Jak lze vidět z grafu č. 9 tečení materiálu se „ustálilo“ po cca 120 hodinách kdy probíhající deformace dosahovala velmi malých hodnot. Vzorek se po této době zkroutil o úhel  $1.04^\circ$ . Jelikož se tato práce creepem nezabývá, nebude tato část dále popisovaná z neznalosti tématu. Tímto měřením jsme potvrdily možnost použití zařízení pro tuto zkoušku.

## 8 Závěr:

V této práci bylo prověřeno mnou vyrobené zařízení, které převyšovalo zadané parametry a svou funkci plnilo dobře. Během vývoje se vyskytly různé konstrukční problémy, které byly zdárně vyřešeny.

Lepený navržený spoj, který byl navrhnout sice nesplnil předem očekávané parametry ale jeho využití je možné po určitých úpravách.

Při analýze byla vyvinuta odečítání optického měření, která nám poskytovala dostatečné výsledky. A však je třeba navrhnout výhodnější systém snímání sledované rysky.

Dalším krokem bylo porovnání mezi analytickým řešením a extenzometrie. V tomto srovnání jsme zjistily chybu měření, která dosahovala 18%. Tato chyba byla pravděpodobně způsobena posunem hrotů po zkušební vzorku. Tato chyba by se dala řešit přilepením hrotů ke zkušebnímu vzorku.

Srovnání mezi analytickým měřením a tenzometrií nám dala velmi přesné výsledky, které se shodovaly s analytickým. Toto měření vykazovalo nejlepších výsledků.

Po té došlo ke srovnání grafického a analytického řešení, čímž jsme zjistily, že graf odpovídá grafům nerezových materiálů a dává nám ponětí o deformaci daného vzorku. A však pro použití této metody doporučuji provést kontrolní měření na certifikované stolici a výsledky porovnat.

Posledním měřením byla creepová zkouška která měla potvrdit možnou funkci stolice pro tento typ zkoušky. Stolice ve zkoušce obstála bez problému a dosáhla požadovaných parametrů. Při creepové zkoušce bylo porovnávány rozdíly mezi extenzometrií a tenzometrií kde rozdíly mezi snímanými hodnotami odpovídali 25%. Při dlouhodobém měření byl zjištěn zkrut o úhlu  $1^\circ$ .

Na závěr bych chtěl říci, že výsledky této práce. Dávají zajímavé výsledky, co se týče využitelnosti metod a jejich přesnosti a máme dobrý přehled pro budoucí experimenty.



## Použitá literatura:

### Elektronické zdroje:

- 1.Kolesa, Michal, 2007. *Strojírenské výpočty*, Dostupné z WWW. <<http://www.michal-kolesa.cz/download/strojirenske-vypocty.pdf>> [cit.2015-05-14]
- 2.Vítězslav Trojan, 2013. *Tenzometrická měření*, Dostupné z WWW.  
<[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=53920](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53920)>  
[cit.2015-05-14]
- 3.Vybíral, Bohumil, 2007. *Mechanika pružného tělesa*, Dostupné z WWW.  
<[http://www.jaroska.cz/fo/\\_media/archiv/knihovna/pruznost\\_booklet.pdf](http://www.jaroska.cz/fo/_media/archiv/knihovna/pruznost_booklet.pdf)> [cit.2015-05-14]
- 4.Trhoň,Vojtěch, 2011. *Vliv povrchu na pevnost lepeného spoje*, Dostupné  
z [WWW.<https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=38664](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38664)  
> [cit.2015-05-14]

### Seznam použitých symbolů a zkratek:

C	Uhlík
Si	Křemík
Mn	Mangan
P	Fosfor
S	Síra
Cr	Chrom
Ni	Nikl
Mo	Molybden
N	Dusík

### Jednotka:

D	Velký průměr vzorku	[mm]
d	Průměr díry ve vzorku	[mm]
R <sub>m</sub>	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$\tau_p$	Mez pevnosti ve smyku	[MPa]
R <sub>1</sub>	Poloměr velkého průměru vzorku	[mm]
R <sub>2</sub>	Poloměr díry ve vzorku	[mm]
M <sub>km</sub>	Mezní krouticí moment	[Nm]
D <sub>h</sub>	Velký průměr hřídele	[mm]
d <sub>h</sub>	Průměr díry v hřídeli	[mm]
k	Bbezpečnost	[-]
l	Bélka pera	[mm]
k <sub>p</sub>	Bezpečnost pérového spoje	[-]
t <sub>1</sub>	Výška pera	[mm]
p <sub>d</sub>	Tlak dovolený	[MPa]
$\sigma$	Napětí ve střihu	[MPa]
b	Šířka pera	[mm]
$\tau_d$	Statická smyková pevnost lepidla	[Nmm <sup>2</sup> ]
d <sub>l</sub>	Střední průměr lepeného spoje	[mm]
$\tau_{kp}$	Smykové napětí pro mez elasticity	[MPa]
M <sub>k</sub>	Krouticí moment	[Nm]
W <sub>k</sub>	Modul průřezu v krutu	[mm <sup>3</sup> ]
g	Gravitační konstanta	[ms <sup>-2</sup> ]
l <sub>p</sub>	Délka páky	[mm]

$m$	Hmotnost	[Kg]
$J_p$	Kvadratický polární moment průřezu	[mm <sup>4</sup> ]
$\Upsilon$	Úhel zkosu	[rad]
$\Upsilon_{deg}$	Úhel zkosu	[deg]
$G$	Modul pružnosti ve smyku	[GPa]
$d\varphi$	Elementární uhel zkroucení	[deg]
$r^{'}$	relativní poloměr	[mm]
$dy$	Elementární výška	[mm]
$\vartheta$	úhel zkrutu	[radm <sup>-1</sup> ]
$\varphi$	úhel zkroucení	[deg]
$\varepsilon$	relativní prodloužení	[mm·m <sup>-1</sup> ]

### Seznam použitých obrázků:

Obr.1	Prvotní návrh	str.8
Obr.2	Finální návrh	str.9
Obr.3	Výkres vzorku	str.11
Obr.4	Hřidel	str.13
Obr.5	Spojka	str.14
Obr.6	Lisování za tepla	str.14
Obr.7	Upínač	str.15
Obr.8	Modifikovaný upínač	str.16
Obr.9	Lepený spoj	str.17
Obr.10	Fixátor	str.18
Obr.11	Výsledky MKP	str.18
Obr.12	Základová deska	str.19
Obr.13	Ustavování souososti	str.20
Obr.14	Sestavené zařízení	str.21
Obr.15	Orýsovaný vzorek	str.22
Obr.16	Použitý tenzometr	str.23
Obr.17	Ustavení extenzometru	str.24
Obr.18	Přetržený vzorek	str.25
Obr.19	Připravené zařízení pro tenzometrii a extenzometrii	str.25
Obr.20	Odečítání deformací	str.26
Obr.21	Nastavení rovinnosti	str.26

Obr.22	Odměřování	str.27
Obr.23	Popis deformace při torzi	str.34

### Seznam tabulek:

Tabulka č.1	Chemické složení	str.10
Tabulka č.2	Mechanické vlastnosti	str.10
Tabulka č.3	Naměřené hodnoty	str.27
Tabulka č.4	Analytické řešení	str.30
Tabulka č.5	Výsledky tenzometrie a extenzometrie	str.31
Tabulka č.6	Vypočítaný zkos	str.34

### Seznam grafů:

Graf č.1	Závislost krouťicího momentu na úhlu zkosu	str.28
Graf č.2	Závislost krouťicího momentu na úhlu zkosu	str.31
Graf č.3	Srovnání analytického řešení a extenzometrie	str.32
Graf č.4	Porovnání výsledků do 16 Nm	str.33
Graf č.5	Porovnání extenzometrie a tenzometrie	str.35
Graf č.6	Porovnání tenzometrie a analytického řešení	str.35
Graf č.7	Spojení výsledků tenzometrie a optického měření	str.36
Graf č.8	Creepová zkouška s použitím tenzometrie	str.37
Graf č.9	Creepová zkouška	str.37

### Seznam příloh:

A	Materiálový lis
B	Výroba zařízení
C	Měření grafické
D	Creep s použitím tenzometru
E	Data ze zkoušky creep
F	Atest k materiálu
G	Počítačový model

